

Модель преобразования электроэнергии в водород и метанол, основанная на совместной оптимизации потока энергии и потока материалов

Цзэхун Лю^{a,b}, Цзиньсюань Чжанг^{a,*}, Цзэдун Чжанг^a, Юаньбин Чжоу^a, Цзиньюй Сяо^a, Цзиньмин Хоу^a, Ю Ни^a

^a Глобальная организация по развитию и сотрудничеству в области энергетических взаимосвязей, район Сичэн, Пекин 100031, Китай

^b Лаборатория Сянцзян, Чанша 410205, Китай

Аннотация. Китай обладает разнообразными возобновляемыми источниками энергии. С установлением целей по достижению пиковых углеродосодержащих выбросов и углеродной нейтральности возобновляемые источники энергии, такие как ветровая и фотоэлектрическая энергия, претерпели колоссальное развитие. Однако из-за непредсказуемости и нестабильности такой энергии крупномасштабное развитие возобновляемой энергетики сталкивается с задачами размещения и передачи электроэнергии. В настоящее время основным подходом к развитию возобновляемой энергетики в западном и северном Китае является объединение ветровой, фотоэлектрической и тепловой энергии с проектами сверхвысоковольтных линий электропередачи. Тем не менее, решение задач, связанных с высоким уровнем выбросов углекислого газа, улавливанием углекислого газа и использованием тепловой энергии по-прежнему необходимо. На основе технологий преобразования энергии в водород, метанол и обогащенного кислородом сжигания в данной статье предлагается модель преобразования энергии в водород и метанол, основанная на совместной оптимизации потока энергии и потока материалов, которая, как ожидается, позволит одновременно решить задачи использования возобновляемых источников энергии и низкоуглеродной трансформации тепловой энергии. Разработаны модели с различными способами преобразования электроэнергии в водород и метанол, а в модель планирования включено моделирование работы в течение 8760 часов. Затем проведено исследование на примере возобновляемых источников энергии в пустынях западного и северного Китая. Результаты показывают, что модель преобразования электроэнергии в водород и метанол, основанная на совместной оптимизации потока энергии и потока материалов, может значительно снизить потребность в хранении водорода и энергии, уменьшить стоимость снижения уровня углерода, в полной мере использовать субкислород и полученный диоксид углерода, а также производить высокоценное химическое сырье, демонстрируя тем самым значительные экономические преимущества.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика; снижение уровня кислорода при сжигании; преобразование энергии в водород; преобразование энергии в метанол; поток энергии; поток материалов

0 Введение

Продвижение экологически чистого и низкоуглеродного энергетического перехода и создание безопасной, эффективной и чистой системы возобновляемой энергии являются одними из ключевых задач, необходимых для достижения «углеродной нейтральности» [1,2]. Для достижения своих целей по «двойному углеродному балансу» Китай предложил, чтобы к 2030 году доля неископаемой энергии в первичном потреблении энергии составляла приблизительно 25 %, а выбросы CO₂ на единицу ВВП сократились более чем на 65 % по сравнению с уровнем 2005 года. К 2060 году потребление неископаемой энергии составит более 80 %, и будет создана комплексная зеленая и низкоуглеродная циклическая экономическая система, а также чистая, низкоуглеродная, безопасная и эффективная энергетическая система [3]. В настоящее время развитие

возобновляемой энергетики идет быстрыми темпами. По состоянию на конец 2023 года совокупная установленная мощность электрогенерации в Китае составляет приблизительно 2,92 миллиарда киловатт, из которых на гидроэнергетику, ветровую и солнечную энергетику в совокупности приходится 50,4 %, что исторически превышает долю тепловой энергетики (47,6 %) [4].

Однако, несмотря на стремительное развитие возобновляемых источников энергии, таких как ветер и фотоэлектрическая энергия, их выработка характеризуется случайностью и изменчивостью, что создает сложности для крупномасштабного развития возобновляемой энергетики с точки зрения потребления и передачи. В настоящее время основным источником энергии в Китае является угольная энергетика, играющая роль «опоры» и «балласта» в обеспечении стабильного электроснабжения. До настоящего времени объединение ветровой, фотоэлектрической и тепловой энергии со сверхвысоковольтной передачей стало основной моделью развития возобновляемой энергетики в западном и северном Китае [5-7]. Однако угольная энергетика характеризуется высокой интенсивностью выбросов углерода, поэтому в будущем необходимо решить задачу снижения уровня и использования выбрасываемого углекислого газа.

Улавливание, использование и хранение углерода (CCUS) — одна из технологий достижения низких выбросов углерода, при этом снижение выбросов углерода является ключом к его снижению в традиционных тепловых электростанциях [8-10]. Основные технологии такого снижения для тепловых электростанций включают снижение после сжигания, декарбонизацию до сжигания и сжигание с обогащением кислородом [11]. Снижение выбросов после сжигания имеет ряд сложных аспектов, таких как высокое энергопотребление и низкая эффективность снижения выбросов, в то время как декарбонизация до сжигания требует значительных модификаций установок, что приводит к высоким затратам [12-14]. Напротив, обогащенное кислородом сжигание для снижения выбросов сочетает в себе преимущества предварительного и последующего снижения и, как ожидается, позволит решить вышеупомянутые задачи [15,16]. Обогащенное кислородом сжигание относится к технологии сжигания, при которой окислитель, используемый для сжигания, имеет более высокую концентрацию кислорода, чем в воздухе. Дымовые газы, образующиеся при обогащенном кислородом сжигании, имеют концентрацию CO₂ более 80 %, которая после сжатия и очистки может достигать даже более 95 %, что облегчает возможность вторичного использования и сжижение CO₂ [17]. В литературе [18] указывается, что снижение выбросов обогащенного кислородом продукта сгорания является более экономичным по сравнению со снижением из воздуха после сгорания. Однако снижение выбросов обогащенного кислородом продукта сгорания обычно требует дополнительных систем разделения воздуха и производства кислорода, что увеличивает инвестиционные затраты на оборудование до двух раз по сравнению со снижением выбросов после сгорания. Более того, высокое энергопотребление оборудования для разделения воздуха и производства кислорода также приводит к высокой доле электроэнергии, потребляемой самими электростанциями (до примерно 15 % в общей сложности, в 2-3 раза больше, чем у стандартной угольной электростанции), что ограничивает любое дальнейшее повышение ее экономической эффективности [19,20]. В настоящее время стоимость обогащенного кислородом сжигания составляет 300-480 юаней/тонну, при этом на стоимость оборудования для разделения воздуха и энергопотребление приходится до 50 % [21,22].

Совместное развитие ветровой и солнечной энергии с водородом является еще одним важным подходом к содействию внедрению возобновляемых источников энергии. Стандартная ветро-солнечно-водородная система обычно состоит из трех элементов: производства возобновляемой энергии, преобразования электроэнергии в водород и хранения водорода [23-25]. Электролитическое производство водорода обеспечивает гибкую и регулируемую нагрузочную способность, предлагая гибкость во временных масштабах от секунд до минут в зависимости от различных технологических путей [26-29]. Кроме того, хранилища водорода могут обеспечить долгосрочную гибкость, потенциально решая задачу нехватки долгосрочных гибких ресурсов,

вызванную сезонными колебаниями в производстве возобновляемой энергии [30]. В последние годы в различных регионах было реализовано множество проектов «ветровая-солнечная-гидроэнергетика», что привело к ускоренному развитию в индустрии зеленого водорода [31]. Однако текущая стоимость зеленого водорода остается относительно высокой, а смежные отрасли недостаточно развиты. В результате многие завершённые проекты работают с коэффициентами использования ниже ожидаемых [32]. Расширение на последующие этапы химической промышленности представляет собой новую тенденцию в развитии проектов ветро-солнечно-водородной энергетики. Использование произведенного водорода для дальнейших процессов синтеза, таких как производство аммиака или метанола, или для нефтепереработки, привлекает все больше внимания. В настоящее время в Китае реализуются десятки таких проектов [33,34]. Синтез экологически чистого водорода в метанол позволяет преобразовывать водородную энергию в жидкое топливо или химическое сырьё с широкими перспективами применения. Однако в настоящее время этот процесс сталкивается с задачами, связанными с высокими затратами и ограниченными источниками углерода.

При строительстве новых энергосистем и создании систем возобновляемой энергии необходимо обеспечить безопасность и сократить выбросы CO₂. Поэтому необходимо решать задачи крупномасштабного развития, внедрения возобновляемых источников энергии и преобразования угольных электростанций в низкоуглеродные, регулирующие источники энергии. Среди 12 основных сложностей и задач, выбранных Китайским обществом электротехники на 2023 год, три тесно связаны с этим вопросом [35]. Считается, что технологии преобразования энергии в водород и метанол играют важную роль в достижении углеродной нейтральности [23,36]. Например, в литературе [37] предложена система преобразования энергии в водород на основе глубокого обучения для снижения ограничений производства ветровой и солнечной энергии. В литературе [38] проанализированы характеристики колебаний солнечной энергии и оптимизирована емкость батареи и резервуара для хранения водорода, что уменьшило колебания поставок водорода и снизило выбросы CO₂. В литературе [39] предложена стратегия управления переменной нагрузкой для системы преобразования электроэнергии и биомассы в метанол. В литературе [40] проанализирована взаимосвязь между электроэнергией и метанолом на основе линейной модели. Однако исследования, объединяющие побочный продукт — кислород электролиза воды, обогащенное кислородом сжигание, снижение выбросов углерода и технологии преобразования электроэнергии в метанол, все еще отсутствуют.

На основе исследований по совместному развитию ветро-солнечных энергосистем, производства водорода и метанола, а также снижения выбросов углерода при сжигании обогащенного кислородом топлива на угольных электростанциях, в данной статье предлагается новая модель преобразования электроэнергии в водород и метанол, основанная на совместной оптимизации потоков энергии и материалов, и представлен пример ее применения. Эта новая модель использует гибкую технологию производства водорода методом электролиза для поглощения избыточной возобновляемой энергии с целью производства экологически чистого водорода; кислород, образующийся в результате электролиза, затем используется для обогащенного кислородом сжигания на угольных электростанциях, что упрощает процесс снижения выбросов углерода. Зеленый водород и углекислый газ, производящиеся угольными электростанциями, далее синтезируются в химические продукты, такие как метанол, что позволяет достичь органического сочетания производства возобновляемой энергии, водорода методом электролиза, обогащенного кислородом сжигания, снижения выбросов углерода и синтеза метанола. Ожидается, что эта новая модель позволит одновременно решить две основные задачи: использование возобновляемой энергии и высокие выбросы углерода от угольных электростанций.

1. Модель преобразования электроэнергии в водород и метанол, основанная на совместной оптимизации потока энергии и потока материалов

1.1 Схемотехническое проектирование

Предложенная в данной статье общая стратегия направлена на интеграцию экологически чистой электроэнергии, экологически чистого водорода и продуктов на основе экологически чистого водорода с сокращением и утилизацией углекислого газа, обогащенным кислородом сжиганием посредством технологической интеграции и согласованием спроса и предложения. Такой подход призван способствовать стабильному и надежному снабжению экологически чистой электроэнергией, эффективному поглощению экологически чистой электроэнергии и водорода, сокращению выбросов углерода на существующих тепловых электростанциях и развитию новых отраслей промышленности на основе экологически чистого водорода. Конструкция модели показана на рис. 1. Зеленый водород, получаемый в результате электролиза воды с использованием энергии ветра и солнца, служит сырьем для синтеза метанола. Образующийся в качестве побочного продукта кислород непосредственно используется для обогащенного кислородом сжигания на тепловых электростанциях, что исключает необходимость в традиционном оборудовании для разделения воздуха и снижает энергопотребление. Кроме того, углекислый газ, образующийся на тепловых электростанциях, служит сырьем для реакции с зеленым водородом при синтезе метанола, эффективно превращая отходы в ценный ресурс. Эта модель обеспечивает эффективное размещение и передачу возобновляемых источников энергии, одновременно решая такие задачи, как однорежимное развитие моделей производства «зеленого» водорода, высокие выбросы углерода от вспомогательных тепловых электростанций и повышенные затраты, связанные со снижением выбросов углерода.

С точки зрения крупномасштабного развития возобновляемых источников энергии, модель преобразования электроэнергии в водород и метанол в полной мере использует гибкость нагрузки крупномасштабного производства водорода или метанола и дополняется хранением электроэнергии, водорода и метанола; производством водородной энергии; и существующими тепловыми электростанциями. Таким образом, модель может обеспечить гибкие ресурсы для корректировки энергосистемы до нулевого уровня выбросов углерода для возобновляемой энергетики в краткосрочной и долгосрочной перспективе, решить задачи нехватки таких ресурсов вблизи возобновляемой энергетики и необходимости сокращения выбросов углерода на регулирующих угольных электростанциях, повысить стабильность и управляемость выработки электроэнергии на базе, а также обеспечить безопасное и надежное электроснабжение. С точки зрения углеродно-нейтральной трансформации промышленности, модель совместного производства электроэнергии, водорода и метанола способствует применению экологически чистой электроэнергии и водорода в традиционной химической промышленности и помогает стимулировать низкоуглеродную трансформацию отраслей с высоким уровнем выбросов углерода, таких как нефтехимическая и углехимическая промышленность.

1.2. Потомки энергии и материалов в модели преобразования электроэнергии в водород и метанол

Оптимизация потока энергии направлена прежде всего на обеспечение того, чтобы ветровая и фотоэлектрическая энергия могли использовать гибкость, предоставляемую тепловой энергией, системами хранения энергии и электролизным оборудованием, для достижения стабильного электроснабжения, производства водорода и метанола. Ветровая и фотоэлектрическая энергия являются основными источниками энергии для системы и служат главными источниками энергии для электролиза воды при производстве водорода. Тепловая энергетика функционирует главным образом как регулирующий источник энергии, обеспечивающий стабильную передачу электроэнергии из возобновляемых источников, а также гарантирующий необходимое электроснабжение для химических процессов, таких как синтез метанола и дистилляция. Электролиз служит регулируемой нагрузкой и обеспечивает важный гибкий ресурс регулирования. В сочетании с оборудованием для хранения водорода и производства водородной энергии он

потенциально может уменьшить масштабы хранения энергии на возобновляемых источниках энергии, обеспечивая тем самым их регулируемую мощность. После оптимизации соотношения энергии ветра, фотоэлектрической энергии, тепловой энергии, производства водорода и его хранения становится возможным производство водорода с использованием избыточной возобновляемой энергии и стабильная передача возобновляемой энергии при сохранении экономической целесообразности. В «зеленом» водороде электрическая энергия, вырабатываемая ветром, фотоэлектрической энергией и тепловой энергией, преобразуется в химическую энергию. Водород может использоваться в дальнейшем в системах отопления транспорта или металлургии, а также преобразовываться обратно в электричество с помощью топливных элементов, а также служить сырьем для производства метанола. Традиционное производство метанола представляет собой непрерывный и стабильный химический производственный процесс, требующий высокой стабильности электроснабжения. Синергия между экологически чистой электроэнергией, экологически чистым водородом и производством метанола должна решить задачу координации колеблющейся возобновляемой энергии с непрерывным и стабильным процессом синтеза метанола [41]. Помимо обеспечения углеродными элементами, угольные электростанции также служат важным регулирующим источником энергии для обеспечения электроснабжения химического производства. Накопители энергии и водорода служат важным буфером между производством возобновляемой энергии, электролизом водорода и синтезом метанола. С развитием гибких технологий химической инженерии, в будущем синтез метанола может позволить вносить корректировки в определенном диапазоне, что позволит лучше адаптировать его к колебаниям производства возобновляемой энергии.

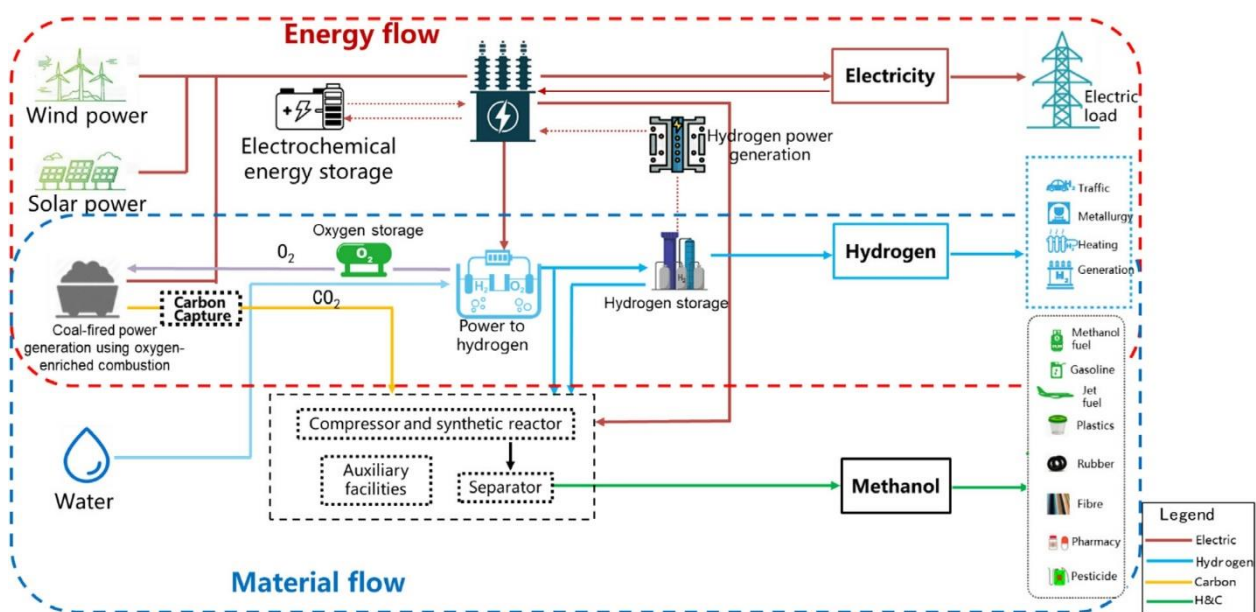


Рис. 1. Схема модели преобразования энергии в водород и метанол, основанной на совместной оптимизации потока энергии и потока материалов.

Однако оптимизация потоков материалов направлена прежде всего на достижение цикличности и интеграции элементов водорода, кислорода и углерода, а также их соответствующих соединений в производственные процессы. Основными материальными ресурсами для всей системы являются вода и уголь, используемые в теплоэнергетике. Водород, получаемый в результате электролиза воды, служит источником водорода для синтеза метанола, тогда как источником углерода для синтеза метанола является снижение выбросов углерода в процессе теплоэнергетики. Коллективные проекты по совместному использованию энергии ветра и солнца с водородом часто упускают из виду потенциальное применение кислорода, образующегося в качестве побочного продукта при электролизе воды. Данная модель использует избыток кислорода, образующегося при электролизе воды, в качестве сырья для обогащенного кислородом сжигания в тепловых

электростанциях, тем самым повышая эффективность существующих тепловых электростанций. Кроме того, без необходимости в дополнительных системах разделения воздуха для производства кислорода, снижение выбросов углерода может быть достигнуто с меньшими затратами, что демонстрирует очевидное экономическое преимущество. При реакции водорода и диоксида углерода с образованием метанола образуется побочный продукт — вода, которую также можно повторно использовать.

Основные химические реакции во всей системе представлены ниже:



Химическое уравнение (1) иллюстрирует реакцию электролиза воды с образованием водорода и кислорода, химическое уравнение (2) — основную реакцию сжигания угля в среде, обогащенной кислородом, а химическое уравнение (3) — основную реакцию гидрирования диоксида углерода с образованием метанола. Углерод в угле в уравнениях (2) и (3) в конечном итоге превращается в углерод в метаноле, тогда как водород и кислород в воде в конечном итоге оказываются в продукте — метаноле и побочном продукте — воде.

Для реакции синтеза метанола в уравнении (3),

$$M_{\text{H}_2} = M_{\text{CH}_3\text{OH}} \frac{3M_{\text{rH}_2}}{M_{\text{rCH}_3\text{OH}}} / \eta_{\text{H}_2} \quad (4)$$

$$M_{\text{CO}_2} = M_{\text{CH}_3\text{OH}} \frac{M_{\text{rCO}_2}}{M_{\text{rCH}_3\text{OH}}} / \eta_{\text{CO}_2} \quad (5)$$

где $M_{\text{CH}_3\text{OH}}$ — выход метанола; M_{H_2} и M_{CO_2} — массы водорода и диоксида углерода, необходимые для синтеза метанола, соответственно; M_{rH_2} , M_{rCO_2} и $M_{\text{rCH}_3\text{OH}}$ — относительные молекулярные массы водорода, диоксида углерода и метанола, соответственно; и η_{H_2} и η_{CO_2} — степени превращения водорода и диоксида углерода, соответственно, при синтезе метанола путем гидрирования диоксида углерода.

Когда вся система достигает нулевых выбросов углерода, углекислый газ, образующийся при сжигании обогащенного кислородом топлива на угольных электростанциях, полностью улавливается и преобразуется в метанол. Необходимое количество кислорода можно рассчитать по уравнению (2):

$$M_{\text{O}_2} = M_{\text{CO}_2} \frac{M_{\text{rO}_2}}{M_{\text{rCO}_2}} \quad (6)$$

Если водород, полученный электролизом, полностью используется для производства метанола, то согласно уравнению (1),

$$M_{\text{H}_2}^{\text{produce}} = M_{\text{H}_2} \quad (7)$$

$$M_{\text{O}_2}^{\text{produce}} = M_{\text{H}_2}^{\text{produce}} \frac{M_{\text{rO}_2}}{2M_{\text{rH}_2}} \quad (8)$$

где $M_{\text{H}_2}^{\text{produce}}$ и $M_{\text{O}_2}^{\text{produce}}$ представляют собой массы водорода и кислорода, соответственно, образующихся при электролизе воды.

Результаты расчетов:

$$M_{O_2}^{produce} = 1.7M_{CH_3OH} \quad (9)$$

$$M_{O_2} = 1.0M_{CH_3OH} \quad (10)$$

Таким образом, кислород, образующийся в качестве побочного продукта электролиза, может полностью удовлетворить потребность в кислороде для сжигания в обогащенной кислородом среде в системе совместного производства водорода и метанола с нулевым выбросом углерода, при этом избыток кислорода все еще остается доступным. Избыточный кислород может быть продан для использования в таких отраслях, как металлургия, химическая промышленность и здравоохранение, что принесет дополнительные экономические выгоды.

2. Пример совместной оптимизации для модели преобразования электроэнергии в водород и метанол, основанная на воспроизведении работы в течение 8760 часов

В данной статье предлагается модель планирования для совместной оптимизации потока энергии и потока материалов в модели преобразования электроэнергии в водород и метанол, основанная на воспроизведении работы в течение 8760 часов. Модель направлена на оптимизацию наилучшего показателя мощности каждого устройства во всей системе, принимая за цель общую экономическую эффективность системы. Она устанавливает соотношение преобразования материалов между водородом, кислородом и углеродом на основе уравнений химических реакций (1)-(3), а также устанавливает соотношение преобразования материалов в электроэнергию, используя теплотворную способность водорода и углерода. Электролизеры, водородные топливные элементы и тепловые электростанции — это устройства, которые осуществляют преобразование каждого элемента и являются ключевыми элементами модели. На основе характеристик и реальных условий различных задействованных технологий устанавливаются рабочий диапазон и скорость изменения параметров каждого процесса, при этом оборудование для хранения энергии и водорода служит буфером между этапами процесса.

2.1. Модель возобновляемой энергии

Данная модель учитывает вероятностный характер производства ветровой и солнечной энергии, позволяя системе ограничивать часть производства возобновляемой энергии, когда возможности гибкой регулировки недостаточны, одновременно накладывая ограничения на минимальный коэффициент использования ветровой и солнечной энергии.

1. Ограничения на производство ветровой энергии

$$P_t^{WT} + P_{aban,t}^{WT} = \omega_t^{WT} P_{rate}^{WT} \quad (11)$$

$$P_t^{WT}, P_{aban,t}^{WT} \geq 0 \quad (12)$$

2. Ограничения на фотоэлектрическую выходную мощность

В этих уравнениях P_t^{WT} и P_t^{PV} представляют собой выходную мощность ветроэнергетических и фотоэлектрических установок соответственно в интервале времени t ;

ω_t^{WT} и ω_t^{PV} обозначают доли выходной мощности ветроэнергетических и

фотоэлектрических установок соответственно в интервале времени t ; а P_{rate}^{WT} и P_{rate}^{PV}

указывают установленные мощности ветроэнергетических и фотоэлектрических установок соответственно.

3. Ограничение на коэффициент использования возобновляемой энергии

$$\delta_i \geq \kappa, i \in \{WT, PV\} \quad (15)$$

В этом выражении δ_i представляет собой годовой коэффициент использования возобновляемых источников энергии для производства электроэнергии типа i , а κ — заданный пороговый уровень.

$$P_t^{PV} + P_{aban,t}^{PV} = \omega_t^{PV} P_{rate}^{PV} \quad (13)$$

$$P_t^{PV}, P_{aban,t}^{PV} \geq 0 \quad (14)$$

2.2. Модель электрохимического накопления энергии

Модель учитывает эффективность зарядки и разрядки электрохимического накопителя энергии и имитирует потери энергии в процессе зарядки и разрядки.

$$V_t^{Battery} = V_{t-1}^{Battery} + P_t^{Battery} \quad (16)$$

$$P_t^{Battery} = P_t^{Battery, Charge} \eta_{Battery, Charge} - P_t^{Battery, Discharge} / \eta_{Battery, Discharge} \quad (17)$$

где $V_t^{Battery}$ и $V_{t-1}^{Battery}$ представляют собой оставшуюся энергию батареи в интервалах времени t и $t-1$ соответственно; $P_t^{Battery}$ - это чистая мощность зарядки батареи, при этом положительные значения указывают на зарядку, а отрицательные — на разрядку; $P_t^{Battery, Charge}$ и $P_t^{Battery, Discharge}$ обозначают мощность, используемую для зарядки аккумулятора от сети и для его разрядки, соответственно; а $\eta_{Battery, Charge}$ и $\eta_{Battery, Discharge}$ обозначают эффективность зарядки и разрядки батареи соответственно.

2.3. Модель электролизера и водородного топливного элемента

Электролизер и водородный топливный элемент являются важными узлами для преобразования электроэнергии в водород и кислород. Уравнение (18) моделирует скорость производства водорода электролизером, тогда как уравнение (19) рассчитывает скорость производства водорода на основе уравнения электролиза воды (1) и атомных масс водорода и кислорода. Между тем, уравнение (20) моделирует скорость производства электроэнергии водородным топливным элементом.

$$H_t^{Hydrogen} = P_t^{Hydrogen} \eta_{Hydrogen} / L_{HVHydrogen} \quad (18)$$

$$O_t^{Hydrogen} : H_t^{Hydrogen} = 8 : 1 \quad (19)$$

$$P_t^{Fuelcell} = H_t^{Fuelcell} \eta_{Fuelcell} L_{HVhydrogen} \quad (20)$$

$$0 \leq P_t^{Hydrogen} \leq P_{rate}^H \quad (21)$$

$$0 \leq P_t^{Fuelcell} \leq P_{rate}^{FC} \quad (22)$$

где H_t^{Hydrogen} , P_t^{Hydrogen} , O_t^{Hydrogen} и H_t^{Fuelcell} обозначают соответственно скорость производства водорода, мощность электролиза, эффективность электролиза воды и скорость производства кислорода электролизером;

$L_{\text{HVC}}^{\text{Hydrogen}}$ является низшей теплотворной способностью водорода; η^{Fuelcell} представляют собой скорость потребления водорода и эффективность выработки

электроэнергии топливным элементом соответственно; а $P_{\text{rate}}^{\text{H}}$ и $P_{\text{rate}}^{\text{FCcell}}$ представляют собой номинальную мощность электролизера и топливного элемента соответственно.

2.4 Модель тепловой электростанции

В качестве критически важного звена в преобразовании диоксида углерода и кислорода в диоксид углерода и электроэнергию угольные электростанции моделируются в уравнении (24), тогда как их минимальные скорости изменения мощности рассматриваются в уравнениях (25) и (26). Между тем, производство электроэнергии при сжигании углерода и кислорода рассчитывается с использованием уравнения (27), которое устанавливает связь между производством электроэнергии и потреблением кислорода на основе коэффициента массового соотношения кислорода и углерода в процессе сжигания. Подстановка уравнения (27) в уравнение (28) дает расчет массы диоксида углерода, уловленного оборудованием для улавливания и хранения углерода (CCS). Уравнение (29) устанавливает связь между объемом уловленного диоксида углерода и производством электроэнергии с использованием коэффициента массового соотношения углерода и диоксида углерода в процессе сжигания. Наконец, уравнение (30) показывает, что количество диоксида углерода, уловленного угольными электростанциями, равно количеству диоксида углерода, необходимому для синтеза метанола, что указывает на отсутствие дополнительных выбросов углерода

$$0 \leq P_t^{\text{FG}} \leq P_{\text{rate}}^{\text{FG}} \quad (23)$$

$$|P_t^{\text{FG}} - P_{t-1}^{\text{FG}}| \leq P_{\text{lim,ramp}}^{\text{FG}} \quad (24)$$

$$P_t^{\text{FG}} = 0 (P_{t-1}^{\text{FG}} = 0 \wedge P_{t-\tau}^{\text{FG}} > 0) \quad (25)$$

$$P_t^{\text{FG}} > 0 (P_{t-1}^{\text{FG}} > 0 \wedge P_{t-\tau}^{\text{FG}} = 0) \quad (26)$$

$$P_t^{\text{FG}} = O_t^{\text{FG}} \mu_{\text{O}} \cdot C L_{\text{HVC}} \eta_{\text{FG}} \quad (27)$$

$$C_t^{\text{CCUS}} = P_t^{\text{FG}} \eta_{\text{CCUS}} \mu_{\text{C} \cdot \text{CO}_2} / (L_{\text{HVC}} \eta_{\text{FG}}) \quad (28)$$

$$0 \leq C_t^{\text{CCUS}} \leq C_{\text{Cap}}^{\text{CCUS}} \quad (29)$$

$$\sum_{t=1}^T C_t^{\text{CCUS}} = \sum_{t=1}^T M_t^{\text{output}} \frac{M_{\text{rCO}_2}}{M_{\text{rCH}_3\text{OH}}} / \eta_{\text{CO}_2} \quad (30)$$

где P_t^{FG} , P_{t-1}^{FG} и $P_{t-\tau}^{FG}$ обозначают выходную мощность угольных

электростанций в интервалах времени t , $t-1$ и $t-\tau$ соответственно; P_{rate}^{FG} — это номинальная

мощность угольных электростанций; $P_{lim,ramp}^{FG}$ — это максимальное изменение

выходной мощности за единицу времени; O_t^{FG} обозначает потребление кислорода угольными электростанциями; $\mu_o - c$ и $\mu_c - co_2$ — коэффициенты массового соотношения для преобразования кислорода в углерод и углерода в диоксид углерода на основе химического уравнения (2) для сжигания углерода, соответственно; L_{hvc} — нижняя теплотворная способность углерода; η_{FG} обозначает эффективность производства электроэнергии на угольных

электростанциях; C_t^{CCUS} представляет собой скорость улавливания углерода

оборудованием CCS в интервале времени t ; C_{Cap}^{CCUS} и η_{CCUS} обозначают соответственно

мощность и эффективность оборудования CCS; а M_t^{output} представляет собой скорость синтеза метанола в момент времени t .

2.5 Модель синтеза метанола

Модель учитывает ограничения минимальной производительности и скорости изменения параметров оборудования для синтеза метанола. Уравнение (31) устанавливает соотношение массовых долей между диоксидом углерода, водородом и метанолом на основе уравнения (3) и их соответствующих молекулярных масс

$$\frac{C_t^{Methanol}}{\eta_{CO_2}} : \frac{H_t^{Methanol}}{\eta_{H_2}} : M_t^{output} = 44 : 6.9 : 32 \quad (31)$$

$$M_{lim,low}^{output} \leq M_t^{output} \leq M_{rate}^{output} \quad (32)$$

$$|M_t^{Output} - M_{t-1}^{Output}| \leq M_{lim,ramp}^{Output} \quad (33)$$

где $C_t^{Methanol}$ и $H_t^{Methanol}$ описывает скорости потребления

углекислого газа и водорода для синтеза метанола в интервале времени t ; M_t^{output}

$$M_{t-1}^{Output}$$

и M_{t-1}^{Output} представляют собой скорости синтеза метанола в интервалах времени t и t_1 соответственно; $\eta_{Methanol}$ - эффективность синтеза метанола;

$$M_{rate}^{output}, M_{lim,low}^{output} \text{ и } M_{lim,ramp}^{Output}$$

а M_{rate}^{output} , $M_{lim,low}^{output}$ и $M_{lim,ramp}^{Output}$ - это номинальные скорости, минимальные скорости и верхние пределы изменения скорости за единицу интервала времени для оборудования синтеза метанола, соответственно.

2.6. Скоординированная оптимизация модели преобразования электроэнергии в водород и метанол

Для электрической системы уравнение (34) моделирует общий баланс электроэнергии, где производство равно потреблению. Для водородной системы уравнение (35) моделирует баланс водорода в узле резервуара для хранения водорода, где водород, произведенный электролизером, подается на синтез метанола, экспорт водородных продуктов и потребление топливным элементом. Для углеродной системы уравнение (37) моделирует баланс спроса и предложения диоксида углерода в узле устройства хранения CO₂, где CO₂, уловленный электростанцией посредством CCUS, подается на синтез метанола. Для кислородной системы уравнение (39) моделирует баланс спроса и предложения кислорода в узле резервуара для хранения кислорода, где кислород, производимый электролизером, подается на электростанцию для производства электроэнергии или экспортируется в виде кислородных продуктов. Электричество, водород, углекислый газ и кислород преобразуются друг в друга через электролизер, топливный элемент и электростанцию.

1. Баланс электрической системы

$$P_t^{WT} + P_t^{PV} + P_t^{FG} - P_t^{Battery, Charge} + P_t^{Battery, Discharge} + P_t^{Fuelcell} = P_t^{Power, out} + P_t^{Hydrogen} + P_t^{Meth\&Aux} \quad (34)$$

$$P_t^{Power, out}$$

где $P_t^{Power, out}$ - это передача энергии, а

$$P_t^{Meth\&Aux}$$

- это энергия, потребляемая для синтеза метанола и работы установки соответственно.

2. Баланс водородной системы

$$V_t^{Hydrogen} = V_{t-1}^{Hydrogen} + H_t^{Hydrogen} - H_t^{Fuelcell} - H_t^{Methanol} - H_t^{Hydrogen, Output} \quad (35)$$

$$0 \leq V_t^{Hydrogen} \leq V_{Cap}^{Hydrogen} \quad (36)$$

$$V_t^{Hydrogen} \text{ и } V_{t-1}^{Hydrogen}$$

где $V_t^{Hydrogen}$ и $V_{t-1}^{Hydrogen}$ обозначают оставшийся объем водорода в резервуаре для хранения водорода в интервалах времени t и t_1 ,

соответственно; $H_t^{\text{Hydrogen, Output}}$ — это скорость производства водорода на выходе; а $V_{\text{Cap}}^{\text{Hydrogen}}$ - это вместимость резервуара для хранения водорода.

3. Баланс углеродной системы

$$V_t^{\text{CO2}} = V_{t-1}^{\text{CO2}} + C_t^{\text{CCUS}} - C_t^{\text{Methanol}} \quad (37)$$

$$0 \leq V_t^{\text{CO2}} \leq V_{\text{Cap}}^{\text{CO2}} \quad (38)$$

где V_t^{CO2} и V_{t-1}^{CO2} обозначают оставшееся количество диоксида углерода в хранилище диоксида углерода в интервалах времени t и $t1$ соответственно; и $V_{\text{Cap}}^{\text{CO2}}$ - это вместимость хранилища углекислого газа.

4. Баланс кислородной системы

$$V_t^{\text{Oxygen}} = V_{t-1}^{\text{Oxygen}} + O_t^{\text{Hydrogen}} - O_t^{\text{FG}} - O_t^{\text{Output}} \quad (39)$$

$$0 \leq V_t^{\text{Oxygen}} \leq V_{\text{Cap}}^{\text{Oxygen}} \quad (40)$$

где V_t^{Oxygen} и V_{t-1}^{Oxygen} обозначают оставшийся уровень кислорода в резервуаре для хранения кислорода в интервалах времени t и $t1$ соответственно; O_t^{Output} — это скорость производства кислорода на выходе; а $V_{\text{Cap}}^{\text{Oxygen}}$ - это вместимость резервуара для хранения кислорода.

2.7. Целевая функция

В данной статье рассматривается интегрированная система совместного производства водорода и метанола. При оптимизации конфигурации мощности каждого компонента ставится цель минимизировать общую стоимость интегрированной системы с учетом ограничений, связанных с сокращением производства ветровой и солнечной энергии. В частности, это включает инвестиционные и эксплуатационные затраты, которые определяются следующим образом:

$$F = \min(C_{\text{inv}} + C_{\text{ope}}) \quad (41)$$

$$C_{\text{inv}} = C_{\text{inv}}^{\text{FG}} + C_{\text{inv}}^{\text{WT}} + C_{\text{inv}}^{\text{PV}} + C_{\text{inv}}^{\text{Hydrogen}} + C_{\text{inv}}^{\text{Fuelcell}} + C_{\text{inv}}^{\text{Hydrogen,storage}} + C_{\text{inv}}^{\text{Oxygen,storage}} + C_{\text{inv}}^{\text{CCUS}} + C_{\text{inv}}^{\text{Methanol}} \quad (42)$$

$$C_{\text{inv}}^N = \frac{d(1+d)^{Y_N}}{(1+d)^{Y_N}} c_{\text{osN}} C_{\text{aprate}}^N \quad (43)$$

$$C_{\text{ope}} = \sum_{t=1}^T c_{\text{ope}}^{\text{FG}} P_{\text{rate}}^{\text{FG}} + c_{\text{ope}}^{\text{WT}} P_{\text{rate}}^{\text{WT}} + c_{\text{ope}}^{\text{PV}} P_{\text{rate}}^{\text{PV}} + c_{\text{ope}}^{\text{Hydrogen}} P_{\text{rate}}^{\text{Hydrogen}} + c_{\text{ope}}^{\text{Fuelcell}} P_{\text{rate}}^{\text{Fuelcell}} + c_{\text{ope}}^{\text{Hydrogen,storage}} V_{\text{Cap}}^{\text{Hydrogen}} + c_{\text{ope}}^{\text{Oxygen}} V_{\text{Cap}}^{\text{Oxygen}} + c_{\text{ope}}^{\text{CCUS}} C_{\text{Cap}}^{\text{CCUS}} + c_{\text{ope}}^{\text{Methanol}} M_{\text{rate}}^{\text{Output}} \quad (44)$$

где C_{inv} и C_{ope} представляют собой, соответственно, годовые инвестиционные затраты и годовые эксплуатационные расходы системы; $C_{\text{inv}}^{\text{FG}}$, $C_{\text{inv}}^{\text{WT}}$, $C_{\text{inv}}^{\text{PV}}$, $C_{\text{inv}}^{\text{Hydrogen}}$, $C_{\text{inv}}^{\text{Fuelcell}}$, $C_{\text{inv}}^{\text{Hydrogen,storage}}$, $C_{\text{inv}}^{\text{Oxygen,storage}}$, $C_{\text{inv}}^{\text{CCUS}}$, and $C_{\text{inv}}^{\text{Methanol}}$ представляют собой, соответственно, годовые инвестиционные затраты на оборудование для угольной электростанции, ветроэлектростанции, фотоэлектрической электростанции, электролизера, водородного топливного элемента, хранилища водорода, хранилища кислорода, улавливания и хранения углерода и производства

C_{inv}^N

метанола; C_{aprate}^N представляет собой годовую стоимость инвестиций в оборудование N (где N представляет собой вышеупомянутое оборудование); d — ставка дисконтирования; Y_N — это срок службы оборудования; c_{osN} представляет собой удельную инвестиционную стоимость

C_{aprate}^N

оборудования; $c_{\text{ope}}^{\text{FG}}$ является мощностью оборудования; $c_{\text{ope}}^{\text{WT}}$, $c_{\text{ope}}^{\text{PV}}$, $c_{\text{ope}}^{\text{Hydrogen}}$, $c_{\text{ope}}^{\text{Fuelcell}}$, $c_{\text{ope}}^{\text{Hydrogen,storage}}$, $c_{\text{ope}}^{\text{Oxygen}}$, and $c_{\text{ope}}^{\text{CCUS}}$ обозначают через T удельные эксплуатационные затраты угольной электростанции, ветроэлектростанции, фотоэлектрической электростанции, электролизера, водородного топливного элемента, хранилища водорода, хранилища кислорода, установки улавливания и хранения углерода и оборудования для производства метанола соответственно; а T — время выполнения моделирования.

3. Пример исследования модели преобразования электроэнергии в водород и метанол, основанной на совместной оптимизации потока энергии и потока материалов

3.1 Граничные условия

В данном исследовании в качестве примера рассматривается база возобновляемой энергетики в песчано-пустынной местности западного Китая. В настоящее время модель «ветер-солнечная энергия-водород» становится новым трендом в крупномасштабном развитии баз возобновляемой энергетики. Сочетание этой модели с улавливанием углекислого газа для производства метанола позволяет эффективно превращать отходы в ценный ресурс. Благодаря оптимизации энергетических и материальных потоков в процессе производства и использованию побочного кислорода для сжигания обогащенного кислородом топлива, экономическая целесообразность может быть дополнительно повышена.

На основе результатов исследований Организации по развитию и сотрудничеству в области глобального объединения энергосистем в области производства чистой энергии, «зеленого»

водорода и «зеленой» химической промышленности, в данном исследовании в качестве граничных условий используются текущие экономико-технические параметры изучаемого региона. Конкретные параметры подробно описаны в Приложении А. В рассматриваемом проекте обеспечивается мощность в 10 ГВт с минимальным коэффициентом использования 5000 часов вырабатываемой электроэнергии в год при производстве 1 миллиона тонн водорода (4,6 миллиона тонн метанола). Соотношение вырабатываемой электроэнергии и произведенной электроэнергии (включая производство водорода и метанола) составляет приблизительно 1:1.

3.2. Анализ результатов

Процесс производства метанола из электроэнергии можно разделить на три этапа: производство возобновляемой энергии, электролиз воды для получения водорода и синтез метанола. С развитием технологий электролиза водорода постепенно улучшалась регулируемость электролизеров. Были инициированы демонстрационные проекты по гибкому электролизу воды с использованием возобновляемой энергии. Это позволяет обеспечить хорошую синхронизацию этапа электролиза с колебаниями производства возобновляемой энергии. Однако традиционный процесс синтеза метанола из электроэнергии представляет собой непрерывный и стабильный химический производственный процесс. Ключевая техническая задача электрического синтеза метанола заключается в достижении координации между колеблющимися возобновляемыми источниками энергии и непрерывным стабильным синтезом метанола. В этом случае тепловые электростанции обеспечивают важную гибкость в снижении потребности системы в хранении водорода и энергии, одновременно выступая в качестве источника углерода для синтеза метанола. Результаты примера, проанализированного в тематическом исследовании, приведены в таблице 1; при этом преимущества избытка кислорода не рассматриваются. Удельные затраты составляют: электроэнергия — 0,196 юаней/кВт·ч, водород — 15,3 юаней/кг, метанол — 3698 юаней/тонну.

Предложенная модель затем сравнивается с другими способами обработки материальных и энергетических ресурсов следующим образом. Если кислород, полученный электролизом, не используется для обогащения кислородом при сжигании, а применяется улавливание после сжигания, стоимость метанола увеличится до 3921 юаня/тонну при тех же граничных условиях. Если исключить тепловое производство электроэнергии и закупать углекислый газ в качестве источника углерода, потребуется больше водородных хранилищ или даже водородное производство электроэнергии для регулирования сезонных колебаний ветровой и фотоэлектрической энергии. При условии, что стоимость закупленного диоксида углерода привязана к стоимости концентрированного диоксида углерода из дымовых газов (200 юаней/т)[42], стоимость метанола увеличится до более чем 5000 юаней/тонну. Напротив, модель преобразования энергии в водород и метанол, основанная на совместной оптимизации потока энергии и потока материалов, в полной мере использует гибкие ресурсы каждого звена и значительно снижает стоимость улавливания углерода за счет обогащенного кислородом сжигания, демонстрируя тем самым значительные экономические преимущества.

Таблица 1. Результаты исследования.

Case title	Power-to-hydrogen-and-methanol model based on collaborative optimization of energy flow and material flow
Installed wind power capacity (MW)	33,220
Wind power utilization rate	91 %
Installed photovoltaic capacity (MW)	17,000
Photovoltaic utilization rate	91 %
Installed thermal power capacity (MW)	6520
Thermal power generation (GWh)	8900
Installed energy storage capacity (MW)	3880
Hydrogen storage capacity (t)	5840
Oxygen storage capacity (t)	37,000
Ratio of hydrogen storage capacity to annual hydrogen production	0.6 %
Hydrogen power generation capacity (MW)	0
Utilization hours of hydrogen power generation (h)	—
Installed capacity of electrolyzer for hydrogen production (MW)	9900
Total investment (billion yuan)	225
Cost of transmitted electricity (yuan/kWh)	0.196
Cost of hydrogen (yuan/kg)	15.3
Cost of methanol (yuan/t)	3698

Типичный энергетический баланс рассматриваемого случая показан на рис. 2. Нагрузка на производство водорода максимально точно соответствует производству ветровой и солнечной энергии, чтобы снизить потребности системы в хранении энергии. В периоды недостатка ветровой и солнечной энергии для удовлетворения потребности в электроэнергии для химического производства и передачи электроэнергии используются угольные электростанции и небольшое количество накопленной энергии.

В ходе исследования модели преобразования электроэнергии в водород и метанол, основанной на совместной оптимизации потоков энергии и материалов, была достигнута эффективная буферизация между производством водорода и метанола, производством кислорода и обогащенным кислородом сжиганием с улавливанием углерода за счет использования систем хранения водорода и кислорода. На рисунке 3 показаны состояния заряда (SOC) систем хранения водорода и кислорода в течение года.

Стоимость водорода и метанола, производимых с помощью данной модели, тесно коррелирует со стоимостью ветровой и фотоэлектрической энергии. В примере, при текущем уровне технологий, себестоимость производства метанола составляет 3698 юаней/тонну, что превышает рыночную цену метанола (приблизительно 2500 юаней/тонну) и себестоимость производства метанола из угля при цене угля 700 юаней/тонну (приблизительно 2000 юаней/тонну). Снижение стоимости ветровой и солнечной энергии открывает потенциал для повышения экономической эффективности продукта. Будущие параметры себестоимости для различных технологий были определены на основе результатов исследований Организации по развитию и сотрудничеству в области глобального объединения энергосистем, касающихся производства чистой энергии, зеленого водорода, экологически чистой химии и т. д., как подробно описано в Приложении А. На основе расчетов с использованием будущих параметров затрат на каждый год до 2030 года, когда ожидается достижение пика выбросов углерода, прогнозируемая себестоимость производства метанола по модели составит 2835 юаней/тонну. В условиях политики углеродного налога в угольной химической промышленности стоимость метанола будет сопоставима с рыночной ценой метанола на основе угля, когда цена на углерод достигнет 130-170 юаней/тонну. Если вместо этого используется улавливание углерода после сжигания без обогащенного кислородом сжигания, то для экономической целесообразности производства метанола в тех же условиях цена на углерод должна достичь 190-240 юаней/тонну. После внедрения модели преобразования электроэнергии в водород и метанол, основанной на совместной оптимизации потоков энергии и материалов, ожидается, что метанол приобретет конкурентоспособность на рынке на 3-5 лет раньше, чем это ожидается для традиционного производства метанола с использованием электроэнергии. К 2050 году ожидается снижение стоимости метанола до 1583 юаней/тонна, что обеспечит значительные экономические преимущества. Кривые стоимости метанола, полученные с помощью этой модели

и модели преобразования электроэнергии в метанол с использованием улавливания после сгорания, показаны на рис. 4.

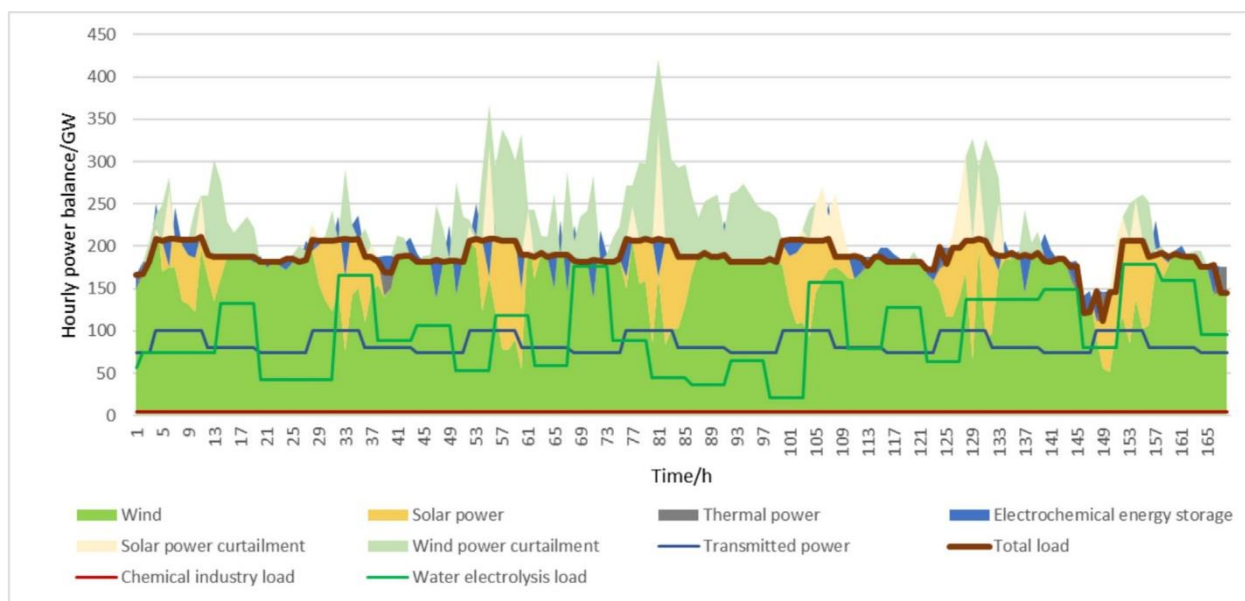
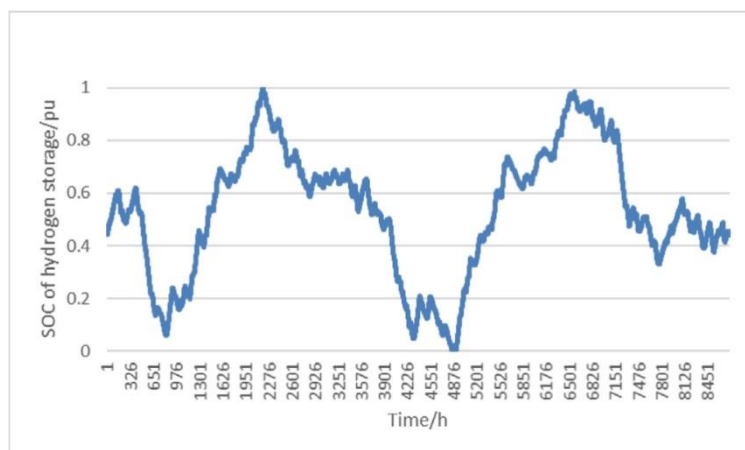
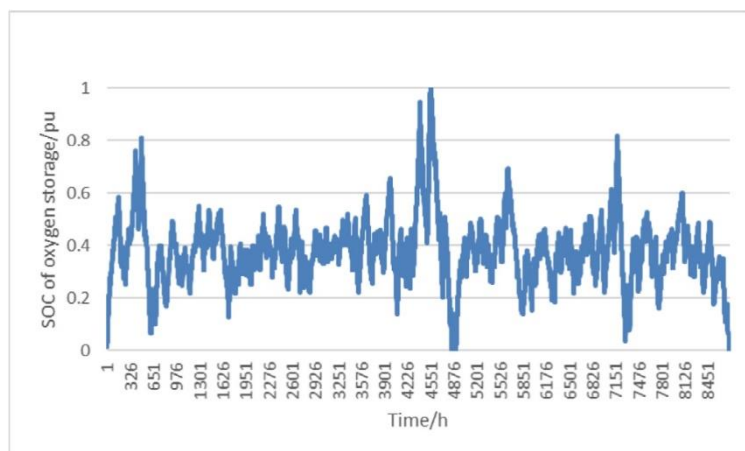


Рис. 2. Баланс мощности в среднестатистические моменты времени.



(a) SOC of hydrogen storage systems



(b) SOC of oxygen storage systems

Рис. 3. Годовые значения SOC для хранения водорода и кислорода.

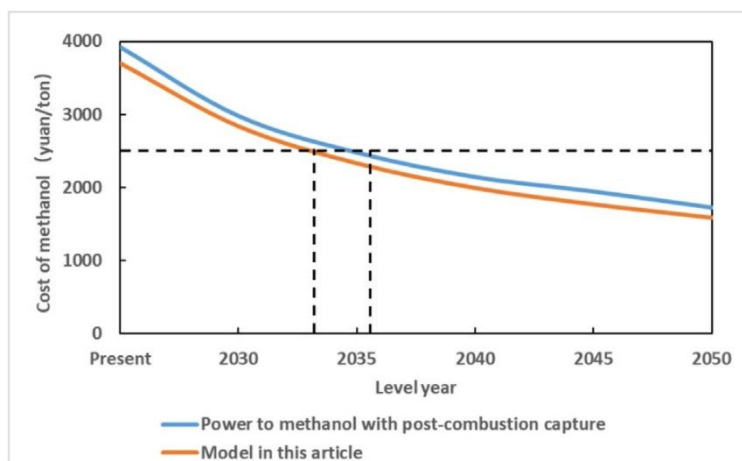


Рис. 4. Кривые себестоимости метанола для двух случаев.

Для дальнейшей демонстрации преимуществ предложенной модели мы также провели исследования на двух сравнительных примерах: примере синергии электроэнергии и водорода и примере синергии электроэнергии, водорода и углерода. В примере синергии электроэнергии, водорода и углерода не предусмотрено использование побочного кислорода и улавливание обогащенного кислородом продукта сгорания, а для обеспечения источника углерода для синтеза метанола используется улавливание после сгорания. В случае синергии электроэнергии и водорода тепловая энергия и улавливание и хранение углерода не учитываются, а метанол синтезируется из экологически чистого водорода и закупленного диоксида углерода по цене 300 юаней/тонна. Результаты, представленные в таблице A2, показывают, что модель преобразования электроэнергии в водород и метанол, основанная на совместной оптимизации потока энергии и потока материалов, обеспечивает наилучшие экономические выгоды.

3.3. Долгосрочные перспективы

Экономическая эффективность модели преобразования электроэнергии в водород и метанол, основанной на совместной оптимизации потоков энергии и материалов, тесно связана со стоимостью производства ветровой и солнечной энергии, а также с технологическими затратами, связанными с производством водорода и метанола. Производство ветровой и солнечной энергии, являясь основным источником энергии, напрямую связано с общими затратами на производство водорода и метанола. По мере развития технологий ожидается снижение инвестиций в оборудование для производства ветровой и солнечной энергии, а также в электролизеры для производства водорода, что приведет к общему сокращению инвестиций в проект. Кроме того, традиционный процесс синтеза метанола представляет собой непрерывный и стабильный процесс, требующий высокой гибкости ресурсов системы. Благодаря достижениям в области гибких химических технологических процессов, таким как интеллектуальное управление реакцией и разработка катализаторов, способных выдерживать широкий диапазон колебаний нагрузки, становится возможным гибкий синтез метанола в определенном диапазоне колебаний нагрузки. Применение гибких технологий синтеза метанола позволит лучше согласовать весь производственный процесс, связанный с производством ветровой и солнечной энергии, одновременно снижая системные требования к хранению энергии и водорода. Это повысит коэффициенты использования ветровой и фотоэлектрической энергии, а также улучшит экономическую эффективность продукции. Одновременно это окажет мощную поддержку развитию и передаче возобновляемой энергии.

Метанол, производимый по этой модели, может быть далее синтезирован в метаноловое топливо и продукты, такие как пластмассы, резина и волокна, что может способствовать потреблению возобновляемой энергии и стимулировать трансформацию и модернизацию местной

промышленности. Помимо метанола, возможно производство высокоценных химических продуктов, таких как муравьиная кислота, что еще больше повысит общую экономическую эффективность проекта.

4. Заключение

В условиях стремительного развития возобновляемой энергетики и ускоренного строительства крупномасштабных ветровых и фотоэлектрических электростанций в пустынных районах и Гоби, задачи содействия использованию возобновляемой энергии, формирования нормативно-правовых ресурсов и управления существующими тепловыми электростанциями приобретают все большее значение. В данной статье предлагается концепция модели преобразования электроэнергии в водород и метанол, основанная на совместной оптимизации потоков энергии и материалов, а также разрабатывается модель совместного производства электроэнергии из водорода и метанола и работы системы на основе таких технологий, как преобразование электроэнергии в водород, преобразование электроэнергии в метанол и производство электроэнергии путем сжигания с обогащением кислородом. Для количественного анализа экономической ценности предложенной модели проведено исследование на примере возобновляемых источников энергии в западном и северном Китае. Модель преобразования электроэнергии в водород и метанол, основанная на совместной оптимизации потоков энергии и материалов, имеет потенциал стать новой формой качественной производительной силы, позволяющей электроэнергии, водороду и другим источникам энергии играть важную роль в большем количестве вариантов моделирования, ускоряя формирование интегрированной энергетической системы, ориентированной на электроэнергию и использующей водород в качестве носителя. Эта комплексная система охватывает основные области, включая энергоснабжение, транспорт и промышленность, способствуя эффективному использованию чистых источников энергии и одновременно содействуя устойчивому развитию различных отраслей.

О вкладе авторов в проект CRediT

Цзэхун Лю: написание-рецензирование и редактирование, привлечение финансирования, концептуализация. **Цзиньсюань Чжанг:** написание-обзор и редактирование, написание-оригинальный проект, методология, исследование. **Цзедун Чжанг:** программное обеспечение, формальный анализ, обработка данных. **Юаньбин Чжоу:** кураторство. **Цзиньюй Сяо:** руководство научно-исследовательской работой. **Цзиньмин Хоу:** написание, обзор и редактирование, оценка корректности, ресурсы. **Ю Ни:** визуализация.

О конфликте интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных конкурирующих финансовых интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность за финансовую поддержку, предоставленную в рамках основной программы лаборатории Сянцзян (№ 23XJ01006).

Приложение А. Граничные условия

1) Производство возобновляемой энергии

На рисунке A1 показаны характеристики производства ветровой и солнечной энергии в среднестатистической пустынной местности и районе Гоби в западных и северных регионах Китая,

предназначенной для развития возобновляемой энергетики. Количество часов использования ветровой энергии составляет 2790 часов, а количество часов использования солнечной энергии — 1780 часов.

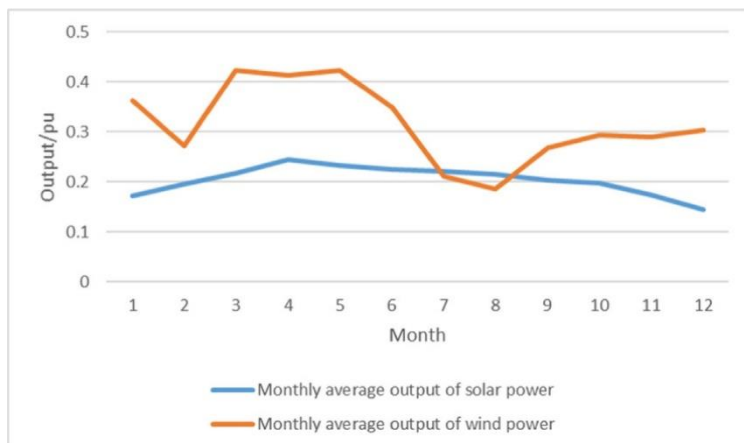


Рис. А1. Характеристики ветроэнергетических и фотоэлектрических ресурсов среднестатистических регионов западного и северного Китая.

2) Статистические характеристики передаваемой мощности

Объем передаваемой мощности установлен на уровне 10 миллионов киловатт, с минимальным временем использования 5000 часов. Статистические характеристики для среднестатистической суточной и годовой передаваемой мощности показаны на следующем рисунке.

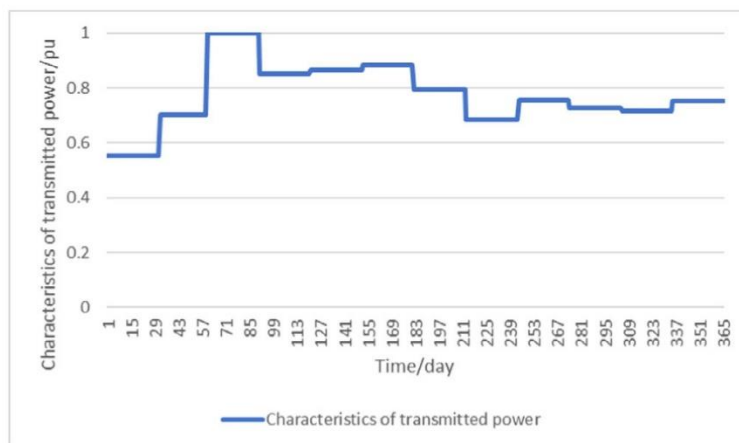
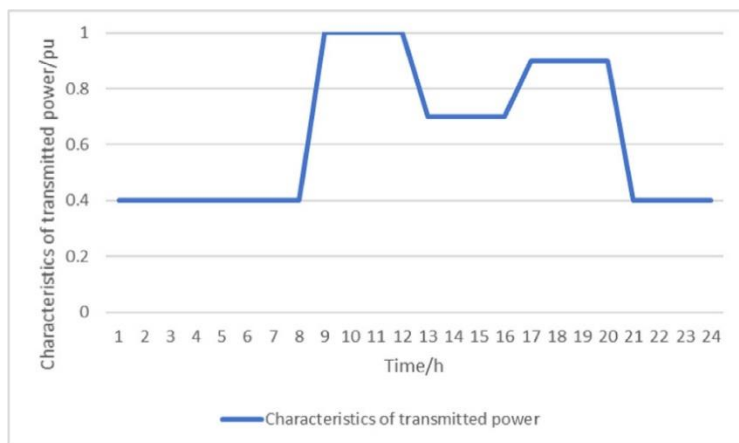


Рис. А2. Суточная и годовая кривая нагрузки отключаемой электроэнергии.

3) Прогнозирование затрат

На основе результатов исследований Организации по развитию и сотрудничеству в области глобального объединения энергосистем по вопросам производства чистой энергии, «зеленого» водорода и «зеленой» химической промышленности, параметры затрат для каждого уровня затрат в настоящее время и в будущем представлены в таблице A1. С учетом ставки дисконтирования 8%, годовые затраты на производство электроэнергии, электролитического водорода и химическое оборудование рассчитываются исходя из срока службы в 25 лет, годовые затраты на оборудование для электрохимического хранения энергии — исходя из срока службы в 10 лет, а годовые затраты на оборудование для хранения водорода и кислорода — исходя из срока службы в 40 лет. Эти годовые затраты используются в качестве параметров затрат для данного исследования.

Таблица A1. Параметры стоимости различных примеров на разных уровнях затрат.

Level year		Present	2030	2040	2050
Power generation	Wind power (yuan/kW)	3500	2500	1800	1500
	Photovoltaic power (yuan/kW)	3000	2200	1400	1000
	Hydrogen power generation (yuan/kW)	5000	4000	3500	3000
	Coal power (yuan/kW)	3000	3000	3000	3000
Energy storage	Electrochemical energy storage (yuan/kWh)	1200	800	600	500
	Hydrogen storage (yuan/kg)	2500	2000	1500	1200
	Oxygen storage (yuan/kg)	20	20	20	20
Power to hydrogen	Alkaline electrolyzer (yuan/kW)	1800	1300	1000	900
	Proton exchange membrane electrolyzer (yuan/kW)	6000	3500	2500	2000
Carbon capture	Post-combustion capture (yuan/t)	330	—	—	—
	Oxygen-enriched combustion capture without air separation (yuan/t)	230	185	150	130
Chemical industry	Conventional (rigid) methanol synthesis (yuan/ton)	2500	—	—	—
	Flexible methanol synthesis (yuan/ton)		3300	3000	2750

4) Сравнительное исследование конкретных случаев

Таблица A2. Результаты случаев в текущем году.

Cases	electricity-hydrogen synergy	electricity-hydrogen-carbon synergy	This case
Total investment (billion yuan)	354.0	245.7	224.9
Cost of electricity (yuan/kWh)	0.278	0.212	0.196
Cost of hydrogen (yuan/kg)	21.8	16.3	15.3
Cost of methanol (yuan/t)	5140	3921	3698

Список используемой литературы

[1] К. Чжоу, Ю. Чен, Б. Сюн и др., Миссия новой энергетики в Китае в рамках достижения углеродной нейтральности, Bull.Chin.Acad.Sci.38(1) (2023)48-58 (на китайском языке).

[2] К. Г. Ван, З. М. Лу, Т. К. Ли и др., Пути перехода к углеродно-нейтральной энергетической системе для регионов с преобладанием угля и регионов с обилием возобновляемых ресурсов: Внутренняя Монголия как пример, Energy Conver.Manage.285 (2023) 117013.

[3] С. Х. Иньбяо, З. Х. Ен, З. Х. Лян и др., Исследование пути перехода к низкоуглеродной энергетике к пику выбросов углерода и углеродной нейтральности, Proc.CSEE 43 (5) (2023) 1663-1672 (на китайском языке).

[4] Национальное энергетическое управление публикует статистические данные по национальной энергетической отрасли за 2023 год [ЕВ/ОЛ]. [2024-01-26] https://www.nea.gov.cn/2024-01/26/c_1310762246.htm.

- [5] Ф.Руи, Угольная энергетика и новые источники энергии несут совместную ответственность за переход, Управление энергетическими предприятиями Китая.1 (2023) 31-33 (на китайском языке).
- [6] Дж. Дин, Г. Чжоу, З. Лю и др. Исследование совместных технологий новых источников энергии и тепловой энергетике. Китайская энергетическая и экологическая защита. 46(02) (2024) 184-190+197 (на китайском языке).
- [7] З. Лю, Ц. Чжан, Ч. Дун и др. Эффективная и безопасная передача энергии ветровых, фотоэлектрических и тепловых электростанций крупных энергетических баз через проекты сверхвысоковольтных линий постоянного тока, Труды CSEE 34 (16) (2014) 2513-2522 (на китайском языке).
- [8] Ю. Цуй, Г. Дэн, П. Цзэн и др., Многомасштабный метод распределения нагрузки источника энергии в энергосистеме с учетом ветроэнергетики и низкоуглеродных характеристик электростанции с улавливанием углерода, Proc.CSEE(2022)1-18, <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.210697>.
- [9] Л.Фажи, З.Сяофэн, К.Госю и др., Исследование по реформированию гибкости тепловых электростанций в соответствии с развитием возобновляемой энергетики, Electric Power Technol.Environ.Protect.38 (4) (2022)265-271.
- [10] З.Н. Чжан, Дж.Ду, М.Х.Ли и др., Двухуровневая оптимизация диспетчеризации интегрированных энергетических систем с P2G и улавливанием углерода, Front.Energy Res.9 (2022) 1-17.
- [11] З. Цзянь, Д. Йиронг, Содействие улавливанию и хранению углерода в Китае: текущее состояние, проблемы и перспективы, Environ.Sci.Manag.46 (08) (2021) 5-8.
- [12] К. Сюй, Дж. Ян, Л. Хэ и др., Улавливание и хранение углерода как стратегический резерв против выбросов CO₂ в Китае, Environ.Dev.37(3) (2021) 100608.
- [13] О. Отитоджу, Э. Око, М. Х. Ван, Техническая и экономическая оценка эффективности улавливания углерода после сжигания с использованием пиперазина для крупных газовых электростанций комбинированного цикла посредством моделирования процесса, Appl.Energy 292 (2021) 1-18.
- [14] З. Лю, Х. Ван, В. Ван и др., Оптимизация мощности низкоуглеродных энергетических систем на основе множественных сценариев работы и технологии улавливания углерода при сжигании с обогащением кислородом, Power Syst.Protect.Control 51 (23) (2023) 115-129.
- [15] К.Х.Яохуа, Д.У.Ершун, Т.И.Сюй и др., Электростанции с улавливанием углерода в энергосистемах: обзор и последние тенденции исследований, J.Global Energy Interconnect.3 (4) (2020) 339-350.
- [16] Дж. Дж. Го, Т.Чжан, П.Ф.Ли, З.Лю, К.Чжэн, Прогресс и тенденции промышленной демонстрации сжигания пылевидного угля в кислородной среде в Китае, Proc.CSEE 41 (4) (2021) 1197-1208.
- [17] И.Ли, Технический и экономический анализ и исследование политики улавливания углерода на угольных электростанциях, Северо-Китайский электроэнергетический университет, Пекин, 2024.
- [18] Т.Т.Ву, Й.И.Лим, Д.Сонг и др., Техничко-экономический анализ сверхкритических электростанций, использующих циркулирующий псевдоожиженный слой с кислородным сжиганием и без улавливания CO₂, Energy 194 (2020) 1-11.

- [19] К.У.Ян, З.Э.Пэн, З.Х.Учжи и др., Низкоуглеродное экономическое распределение электрогазотепловой интегрированной энергетической системы на основе технологии кислородного сжигания, *Proc.CSEE* 41 (2) (2021) 592-608.
- [20] П.Костаманья, Трехтрубная газовая сеть: новая концепция преобразования электроэнергии в газ, связанная с полным улавливанием и использованием углерода, *Energy Conver.Manage.*229 (2021).
- [21] И. Леи, Опубликован ежегодный отчет Китая о технологиях улавливания, использования и хранения углекислого газа (CCUS) (2021 г.), в котором предлагается создание крупномасштабных демонстрационных кластеров CCUS и кластеров индустриализации, *Environ.Econ.*16 (2021) 40-42.
- [22] Б.О. Обойриен, Б. К. Норт, Т. Клейн, Технико-экономическая оценка технологии кислородно-топливного сжигания для угольных электростанций Южной Африки[J], *Energy* 66 (2014) 550-555.
- [23] Дж. Лю, К. Чжон, Текущее состояние и перспективы развития водородной энергетики в Китае, *Energy of China* 41 (2) (2019) 32-36 (на китайском языке).
- [24] Ю.Чен, Ц.Ли, Б.Чжэн и др., Оптимизация распределения мощностей и экономическая оценка на основе интегрированной системы ветро-солнечная-водородная система хранения, *Oil Gas Storage Transp.*42 (7) (2023) 763-773.
- [25] И.Си, Л.Чен, К.Чен и др., Оптимальное распределение мощностей водородного хранилища энергии в ветро-водородной гибридной системе на основе распределенно-устойчивого, *Electric Power Automat.Equipment* 41(10) (2021) 3-10.
- [26] К.Ма , С.Чжан, И.Хэ и др., Состояние исследований и перспективы применения технологии электролиза воды с использованием PEM для производства водорода, *Acta Energiæ Solaris Sinica* 43 (6) (2022) 420-427.
- [27] Б. Чжэн, З. Бай, Ю. Юань и др., Система производства водорода и оптимизация мощности на основе синергетической работы с многотипными электролизерами при ветро-солнечной энергии, *Proc.CSEE* 42 (23)(2022) 8486-8496.
- [28] Дж. Ли, З. Лян, В. Чжао и др., Метод выбора и оценки системы производства водорода в гибридной электролитической ячейке. *High Voltage Eng.* <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20221949>.
- [29] Ц.Хуан, Дж.Чен, С.Цао, Дж.Лю и др., Оптимизация системы производства водорода с использованием ветро-фотоэлектрических элементов на основе синергетического производства водорода с помощью щелочного электролизера и протонно-обменного мембранного электролизера, *Автоматизированное электроэнергетическое оборудование* 43 (12) (2023) 168-174.
- [30] Дж. Сяо, Дж. Хоу, Э. Ду и др., Количественная аналитическая модель и тематическое исследование спроса на хранение энергии, поддерживающего экологически чистую трансформацию электроэнергетической системы, *Автоматизированные электроэнергетические системы* (2020) 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20200720.1309.002.html>.
- [31] К.Цзян, Б.Тан, Г.Ю и др., Метод координации и оптимизации хранения энергии на уровне парка и цены на электроэнергию для локального размещения возобновляемых источников энергии, *Автоматизированные системы электроэнергетики* 46 (5) (2022) 51-61.
- [32] BloombergNEF. Тенденции инвестиций в энергетический переход 2023[R/OL].Bloomberg, 2023.

- [33] Д.Ши, Исследование роли зеленого водорода в сокращении выбросов углерода в нефтеперерабатывающей и химической промышленности, *Petrol.Petrochem.Today* 31(10) (2023) 40-44.
- [34] Р. Чжан, Дж. Чжоу, С. Лян и др., Оптимизация планирования работы и конфигурация мощностей, а также экономический анализ автономной ветро-солнечной интегрированной системы, *Тепловая энергетика*. 53 (02) (2024) 48-58.
- [35] Китайское общество электротехников публикует основные проблемы и задачи в энергетическом секторе на 2023 год [EB/OL]. [2023-05-10]. <https://www.csee.org.cn/portal/xfpxyw/20230510/30819.html>.
- [36] Дж.Ли, К.Ву, Д.Као и др., Зеленый метанол — важный путь достижения углеродной нейтральности, *Engineering* 29 (2023) 27-31.
- [37] Т.Лян, Б.Сан, Дж.Тан и др., Схема планирования ветро-солнечной дополнительной системы производства водорода из возобновляемых источников энергии на основе глубокого обучения с подкреплением, *High Volt.Eng.*49 (6) (2023) 2264-2275.
- [38] Ю.Цянь, Ю.Чен, С.Ши и др., Анализ больших данных характеристик колебаний солнечной энергии и интеграция ветровой фотоэлектрической системы с водородной. *CIESC J.*73(5) (2022) 2101-2110, 2290.
- [39] А.Полуцци, Г.Гуандалини, С.Гуффанти и др., Гибкая энергетика и установки по производству биомассы в метанол с различными технологиями газификации, *Front.Energy Res.*9 (2022) 795673.
- [40] П.Чжан, С.Ванг, Р.Чжан и др., Оптимальный экономический подход к диспетчеризации для электроэнергетической установки в сочетании с угольным энергоблоком на основе SDR и гауссовой рандомизации, *Electric Power Automat.Equipment* 43 (7) (2023) 204-209.
- [41] Г.Янг, Дж.Чжу, К.Янг и др., Гибкое оптимальное планирование электроэнергии для системы синтеза метанола на основе водорода, адаптирующейся к изменяющейся мощности ветра, *Electric Power Construct.*44(11) (2023) 149-162.
- [42] З.Ву, С.Цзянь, Л.Ву, Экономический анализ установок каталитического гидрирования CO₂ в метанол с использованием различных процессов синтеза, *Low-carbon Chem.Chem.Eng.*48 (06) (2023) 60-66.

Получено 13 марта 2025 г.; отредактировано 26 апреля 2025 г.; принято 7 мая 2025 г.

Экспертная оценка под ответственностью Global Energy Interconnection Group Co.Ltd.

* Ответственный автор

Адреса электронных почт: zehong-liu@sgcc.com.cn (Ц.Лю), jinxuan-zhang@geidco.org (Ц.Чжанг), zedong-zhang@geidco.org (Ц. Чжанг), zhouyuanbing@geidco.org (Ю. Чжоу), jinyu-xiao@geidco.org (Ц. Сяо), jinminghou@geidco.org (Ц. Хой), yu-ni@geidco.org (Ю. Ни).

Эта статья переведена из журнала <Global Energy Interconnection> (ISSN: 2096-5117), выпуск 3, 2025 г. Оригинальное название статьи:< Power-to-hydrogen-and-methanol model based on collaborative optimization of energy flow and material flow>. Перевод предоставляется исключительно для справки; преимущественную силу имеет оригинал: <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2025.05.001>

Это статья с открытым доступом, распространяемая по лицензии CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



Цзэхун Лю получил степень бакалавра в Хунаньском университете и степень магистра в Китайском научно-исследовательском институте электроэнергетики. Он долгое время занимался исследованиями и разработками в области технологий и оборудования для передачи постоянного и переменного тока сверхвысокого напряжения, а также руководил планированием, проектированием и строительством десятков проектов по передаче электроэнергии сверхвысокого и сверхвысокого напряжения. Он является лауреатом премии IEEE PES Uno Lamm HVDC 2017 года и 14-й премии Гуанхуа в области инженерных и технических наук Китая.



Цзиньсюань Чжанг получил степень бакалавра в Нанькайском университете и степень доктора наук по химии в Пекинском университете (Пекин, Китай) в 2019 году. В настоящее время работает научным сотрудником в Институте экономических и технологических исследований GEIDCO. Его научные интересы включают в себя хранение энергии, водородную энергетику и планирование энергосистем.



Цзэдун Чжанг получил степень доктора наук в области электротехники в Манчестерском университете (Великобритания). В настоящее время он работает в компании GEIDCO. Его научные интересы включают в себя возобновляемую энергетику, интеллектуальные сети, энергетическую взаимосвязь и активное управление сетями.



Юаньбин Чжоу — заместитель генерального секретаря GEIDCO; эксперт по специальным выплатам Государственного совета; директор Китайской ассоциации возобновляемой энергетики; член экспертного комитета Альянса аналитических центров государственных предприятий. В сферу его научных интересов входят стратегия в области энергетики и электроэнергетики, энергетическая политика, чистая энергия и интеллектуальные сети, а также энергетическая взаимосвязь.



Цзиньюй Сяо получил степень бакалавра и доктора наук в области электротехники в Университете Цинхуа, Пекин, в 1999 и 2005 годах соответственно. Он является директором Института экономических и технологических исследований GEIDCO. Его научные интересы включают в себя оценку ресурсов чистой энергии и планирование энергосистем.



Цзиньмин Хоу получил степень бакалавра электротехники в Северо-Китайском электроэнергетическом университете в 2002 году и степень магистра электротехники в том же университете в 2006 году. Его научные интересы включают в себя энергетические системы и автоматизацию.



Ю Ни получил степень доктора наук в Сианьском университете Цзяотун в Сиане, Китай. В настоящее время он работает в GEIDCO. Его научные интересы включают в себя планирование энергосистем, устойчивость и управление, а также моделирование возобновляемой энергетики.