

УДК 621.311

ЦИКЛ ZECOMIX КАК АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ПРИНЦИП РАБОТЫ
УГОЛЬНОЙ ТЭС
THE ZECOMIX CYCLE AS AN ALTERNATIVE OPERATING PRINCIPLE
OF A COAL-FIRED THERMAL POWER PLANT

А.И. Сироткин

Научный руководитель – Н.В. Пантелей, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

A. Sirotkin

Supervisor – N. Panteley, Senior Lecturer
Belarusian national technical university, Minsk

Аннотация: в данной статье проводится краткий анализ принципа работы угольной тепловой электрической станции, работающей по циклу «Zecomix». Данный цикл позволяет за счёт различных химических реакций и процессов избежать вредных выбросов в окружающую среду и практически полностью уловить углерод – один из основных источников загрязнения. Данная станция является экспериментальной: она создана таким образом, чтобы можно было варьировать основные рабочие параметры с целью определения их влияния на КПД установки и оптимизацию технологического процесса.

Abstract: this article provides a brief analysis of the principle of operation of a coal-fired thermal power plant operating on the "Zecomix" cycle. This cycle makes it possible, through various chemical reactions and processes, to avoid harmful emissions into the environment and almost completely capture carbon – one of the main sources of pollution. This station is experimental: it is designed in such a way that it is possible to vary the main operating parameters in order to determine the influence their efficiency of the installation and optimization of the technological process.

Ключевые слова: тепловая электростанция, углерод, выбросы, синтез-газ, химические реакции, высокотемпературная паровая турбина.

Key words: thermal power plant, carbon, emissions, synthesis gas, chemical reactions, high temperature steam turbine.

Введение

Несмотря на большое количество международных соглашений и законов, касающихся климата, экологической обстановки и загрязнения окружающей среды, по состоянию на 2022 год доля угольных электростанций составляет около 24%. На сегодняшний день в мире работают 2,5 тысячи угольных ТЭС общей мощностью 2100 ГВт [1]. Казалось бы, что наличие огромных запасов природного газа, строительство новых АЭС и активное распространение «зелёной» энергетики навсегда должны были решить вопрос с использованием угля для получения энергии, однако на деле всё оказалось иначе. За последние несколько лет, несмотря на пандемию, генерация энергии за счёт сгорания угля увеличилась на 9% и, судя по всему, закрывать станции на данном типе топлива никто не собирается. Более того, по данным Global Energy Monitor в ближайшие годы планируется строительство ещё 485 электростанций общей мощностью

456 ГВт [1]. Эксперты связывают это с подорожанием природного газа и, как следствие, снижением цены на уголь. В этой связи учёные и инженеры пытаются найти технологии, которые позволят сжигать уголь и не загрязнять при этом окружающую среду. Ведь в целом ТЭС на твёрдом топливе являются одними из самых «грязных» электростанций даже несмотря на то, что сейчас на таких объектах устанавливаются различного рода фильтры, улавливатели и т. д. Одно из решений этой проблемы предложили учёные Итальянского технического университета («Politecnico di Milano») при содействии Итальянского национального агентства по новым технологиям, энергетике и устойчивому экономическому развитию (ENEA) [3]. Они придумали цикл «Zesomix», позволяющий переработать и использовать в полезных целях практически весь углерод, из которого по большей части и состоит уголь, и при этом получать помимо электроэнергии жидкий углекислый газ для дальнейшего использования в промышленных целях.

Основная часть

«Zesomix» – это аббревиатура проекта «Zero Emission Coal Mixed», возглавляемого, как уже было сказано выше, Итальянским техническим университетом и агентством ENEA при содействии промышленного партнёра Ansaldo [3]. Эта технология обещает очень высокую эффективность преобразования энергии при практически полном отсутствии выбросов в атмосферу. Для демонстрации её осуществимости, а также для практических исследований и определения основных рабочих параметров и необходимого оборудования для реальной станции, была построена экспериментальная установка в исследовательском центре в пригороде Рима – Кассаче. Схема данной установки показана на рисунке 1 [2].

В тепловой электрической станции, работающей по циклу «Zesomix», можно выделить 3 основные части: кислородную, химическую и соответственно энергетическую или основную части. В кислородной части получается чистый кислород, который затем в химической части, в результате различных реакций и взаимодействий с реагентами и углём, позволяет получить синтез-газ, который уже непосредственно используется в качестве топлива для получения энергии [2]. Давайте более подробно рассмотрим каждую часть.

Воздух, предварительно проходя очистительные устройства, попадает в компрессор (К), где сжимается и попадает затем в станцию сепарации кислорода. В ней ненужные и опасные для работы станции вещества (главным образом азот) удаляются, и на выходе получается чистый кислород, который дополнительно сжимается ещё одним компрессором. Далее основной его объём поступает в химическую часть для получения синтез-газа [2].

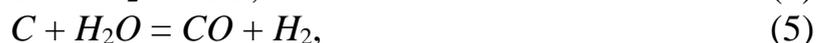
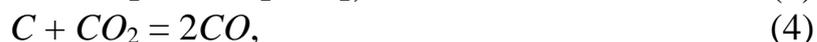
Основными составляющими химической части являются 4 агрегата-реактора, в которых за счёт различных химических реакций уголь и кислород с помощью реагентов преобразуются в жидкий углекислый газ, который отправля-

отправляется на промышленные нужды, и синтез-газ, который используется непосредственно для получения энергии. Синтез-газ – это газообразное вещество, получающееся в химической части и состоящее в основном из водорода [2].

Его сжигание (т.е. соединение с кислородом) позволяет получить пар высоких параметров и использовать его для совершения работы в турбине, о чём будет рассказано ниже. Кислород, уголь и рециркулирующий поток, обогащённый водородом, попадают в гидрогазификатор – первый агрегат-реактор, который работает при давлении 30–70 бар и температуре 700–1000°C [2]. Здесь уголь газифицируется с получением, главным образом, метана в соответствии с экзотермической реакцией гидрогазификации (1):



В гидрогазификаторе протекают также и другие реакции (2) – (7), как экзотермические, так и эндотермические:



Поток, выходящий из гидрогазификатора, поступает в карбонатор 1 ступени, где он реагирует с твёрдым оксидом кальция. Данная химическая реакция позволяет уловить основной объём углекислого газа, в результате чего образуется карбонат кальция или известняк в соответствии с экзотермической реакцией (8):



Удаление углекислого газа из газовой фазы потока приводит к ускорению реакции превращения воды в газ (3) и, следовательно, реакции паро-метанового преобразования (6). В результате всех этих процессов образуется синтез-газ, обогащённый водородом. Следует подчеркнуть, что следующая обобщённая реакция (9), полученная из отдельных реакций (3), (6), (8), является хорошо сбалансированной с тепловой точки зрения:



Другими словами, реакция карбонизации не только способствует получению водорода, необходимого для синтез-газа, путём удаления CO_2 из газовой фазы, но также обеспечивает выделение тепла, необходимого для реакции парового преобразования, что позволяет использовать теплоизолированный реактор и избежать потерь тепла. Часть синтез-газа после карбонатора 1 ступени рециркулирует обратно в гидрогазификатор, однако основной его объём уходит в карбонатор 2 ступени, где дополнительно из него удаляется ещё оставшийся углерод в газовой фазе и при добавлении пара из ЦСД турбины образуется готовое топливо на основе водорода и воды (пара).

Последним реактором в химической части является кальцинатор, где известняк по реакции, обратной реакции (8), превращается обратно в оксид кальция. В итоге образуется поток углекислого газа, проходящий через теплообменник, отдавая тепло в паровой цикл. В конечном итоге он сжимается в компрессоре, сжижается и подаётся по трубе на промышленные нужды (например, на нефтеместорождение для повышения отдачи пластов). Поскольку для работы кальцинатора необходима тепловая энергия, необходим её некоторый источник. В базовом варианте используется прокаливание под высоким давлением, а тепло для прокаливания обеспечивается кислородным обжигом остатков нефтеперерабатывающего завода – гудрона. Возможны и другие варианты работы кальцинатора, однако они являются менее эффективными и в данной работе не рассматриваются.

Высокотемпературный синтез-газ, полученный в химической части, охлаждается в детандере (Д), предварительно очищаясь от захваченных частиц. Температура охлаждения рассчитывается таким образом, чтобы получить предполагаемое значение 550°C [2] на входе в камеру сгорания. Там синтез-газ сжигается с кислородом и расширяется в высокотемпературной паровой турбине (ВПТ). Чтобы ограничить температуру на выходе из камеры сгорания до приемлемых значений, пар из турбины на выходе из теплового цикла регенерации используется в качестве замедлителя температуры. Однако для охлаждения лопаток ВПТ его недостаточно, поэтому производится рециркуляция части пара при давлении, близком к атмосферному, доступного после расширения в ВПТ и рекуперации тепла. Для решения этой задачи был установлен компрессор для сжатия пара. Избыточный пар, не нужный для цикла с ВПТ охлаждается до нужной температуры и расширяется в цилиндре низкого давления (ЦНД) стандартной паровой турбины. После этого данный пар конденсируется и проходя через регенеративные подогреватели с помощью насоса подаётся в цилиндр высокого давления (ЦВД) и, после ещё одного подогрева, в цилиндр среднего давления (ЦСД) паровой турбины. Неконденсирующиеся частицы CO_2 , N_2 , Ar , O_2 , содержащиеся в потоке, удаляются из конденсатора вместе с небольшим количеством пара. Вместо того, чтобы выбрасывать всё это в атмосферу, эта смесь направляется в кальцинатор после надлежащего сжатия (неконденсируемое извлечение и сжатие – обычная практика на геотермальных электростанциях). Таким образом, избыток кислорода полностью рециркулируется в системе и используется в качестве окислителя в кальцинаторе, а улавливание CO_2 завершается, даже если в синтез-газе присутствуют некоторые газированные соединения. Это повышает эффективность установки, и практически никакой углерод из системы не выходит.

Заключение

На сегодняшний день данная, достаточно сложная в строительстве, установка работает в тестовом режиме. Поскольку турбин, способных выдержать требуемые нагрузки ещё не существует, здесь применены экспериментальные агрегаты мощностью по 100 кВт каждый. То есть суммарная мощность экспериментальной станции 200 кВт [3]. Помимо нерешённого вопроса с турбиной, существует также проблема с образующейся в гидрогазификаторе золой (остатками от угля), которая не может участвовать в цикле. Её необходимо куда-то

утилизировать, что на сегодняшний день является не решённой задачей. Кроме того, химическая часть требует дорогостоящего оборудования, и сама по себе является сложной с точки зрения строительства и технологических процессов в ней. Однако эксперименты и исследования продолжаются и, возможно, проблемы в реализации этой идеи будут решены.

Литература

1. Global coal plant tracker [Электронный ресурс] / Global coal plant tracker. – Режим доступа: <https://globalenergymonitor.org/projects/global-coal-plant-tracker/>. – Дата доступа: 01.10.2023.
2. Matteo, R. Zecomix: a zero-emissions coal power plant, based on hydro-gasification, CO₂ capture by calcium looping and high temperature steam cycle / R. Matteo, G. Lozza // Energy Procedia. – 2009. – № 1. – С. 1473–1480.
3. Zecomix – Enea [Электронный ресурс] / Zecomix – Enea. – Режим доступа: https://www.enea.it/en/laboratories-and-facilities/energy_technologies/zecomix/. – Дата доступа: 01.10.2023.