

УДК 621.311

**ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УЛАВЛИВАНИЯ  
ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ НА ТЭС  
INNOVATIVE TECHNOLOGY OF GREENHOUSE GAS CAPTURE  
AT THERMAL POWER PLANTS**

А.И. Сироткин, Г.Ю. Витецкая

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

nvpanteley@tut.by

A. Sirotkin, G. Vitetskaya

Supervisor – N. Panteley, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

**Аннотация:** в данной статье приводится описание новой технологии улавливания парниковых газов, образующихся при сжигании топлива в паровом котле тепловой электростанции, за счёт их карбонизации оксидом кальция. Внедрение этой технологии позволит практически полностью избавиться от вредных выбросов в атмосферу за счёт новой конструкции котлоагрегата. По предварительным результатам, в новой установке по улавливанию дымовых газов, работающей в паре с котлом, будет задерживаться около 97% углекислого газа, который может быть полезно использован как на самой ТЭС, так и на другом производстве.

**Abstract:** this article describes a new technology for capturing greenhouse gases generated by burning fuel in a steam boiler of a thermal power plant, due to their carbonation with calcium oxide. The introduction of this technology will make it possible to almost completely get rid of harmful emissions into the atmosphere due to the new design of the boiler unit. According to preliminary results, about 97% of carbon dioxide will be retained in the new flue gas capture unit, working in tandem with the boiler, which can be usefully used either at the thermal power plant itself or at other production facilities.

**Ключевые слова:** тепловая электростанция, углерод, выбросы, карбонатор, кальцинатор, химические реакции, парниковые газы.

**Key words:** thermal power plant, carbon, emissions, carbonator, calcinator, chemical reactions, greenhouse gases.

### **Введение**

На сегодняшний день, несмотря на все усилия учёных всего мира, большая часть электрической и тепловой энергии продолжает производиться станциями, работающими на ископаемом топливе. Безусловно, нельзя недооценивать применение возобновляемых источников энергии, которые в определённых случаях оказались достаточно эффективными. Также велика роль и атомной энергетики, благодаря которой можно получать огромное количество электроэнергии, затрачивая при этом сравнительно небольшое количество ядерного топлива. Однако, например, технологии «зелёной» энергетики

применимы далеко не везде. В частности, в нашей стране их использование в промышленных масштабах просто невозможно. Да и безотходным такое производство назвать трудно. Ведь основное оборудование таких электростанций, например, лопасти ветряков или солнечные панели, не утилизируются при выходе из строя из-за отсутствия технологий их переработки. Поэтому часто это оборудование просто закапывают в землю, таким образом загрязняя территорию. Атомные электростанции тоже не лишены своих недостатков. Хотя технологии уже шагнули далеко вперёд, тем не менее АЭС – это объект повышенной опасности, и его эксплуатация требует принятия особых мер в области охраны труда и производства. Кроме того, хотя при работе атомного реактора дымовые газы не выделяются, со временем необходимо менять ядерное топливо, в результате чего появляются отходы, также загрязняющие окружающую среду.

В связи с этим имеют смысл поиск, разработка и внедрение технологий, позволяющих модернизировать уже существующие тепловые электростанции, работающие на ископаемом топливе, чтобы уменьшить выбросы вредных веществ в атмосферу или вовсе избежать их. Данные технологии должны быть не сильно дорогостоящими, чтобы существующие предприятия были заинтересованы в их внедрении, и вместе с тем достаточно эффективными, чтобы реконструкция ТЭС имела смысл. Сегодня существует достаточно много исследований и экспериментов в этой области, которые, в частности, описаны в монографиях [1, 2, 3]. В данной же статье речь пойдёт о технологии улавливания углекислого газа за счёт реакции карбонизации с оксидом кальция.

### **Основная часть**

Для того, чтобы избавиться от выбросов вредных веществ, нужно для начала понять, как они попадают в котлоагрегат и в чём причина их образования. В общем случае, в дымовых газах, образующихся при сжигании топлива, могут содержаться водяные пары, углекислый и угарный газы, оксиды серы, азот и его оксиды, а также не сгоревшие кислород и водород. Кроме того, при сжигании твёрдых видов топлива образуются зола и шлак, что ещё более усугубляет экологическую обстановку на территории вокруг станции. Использование в качестве топлива природного газа позволяет избежать образования золы и шлака, а также появления в дымовых газах оксидов серы. Поэтому при проектировании экологически чистой ТЭС на ископаемых видах топлива целесообразно применять для получения теплоты «голубое» топливо.

Рассмотрим, каким образом вышеописанные вещества попадают в продукты сгорания топлива и как этого можно избежать. Азот поступает в котёл, главным образом, с воздухом, поэтому необходимо применять установку сепарации воздуха, которая позволит подавать на горелочные устройства только окислитель, т.е. кислород. Стоит сказать, что азот содержится и в природном газе, однако его содержание очень мало и для газа, поставляемого в Республику Беларусь, составляет 0,942% [4]. Водяной пар, а также не прореагировавшие водород и кислород не являются вредными веществами, поэтому они могут выбрасываться в атмосферу без ограничений. Наличие угарного газа в продуктах сгорания устраняется увеличением коэффициента

избытка воздуха в топке котла или другими мероприятиями, проводящимися в ходе режимно-наладочных испытаний котлоагрегатов, работающих на газе. Данные испытания в Республике Беларусь должны проводиться не реже 1 раза в 3 года.

Таким образом, единственное вредное вещество, которое всё ещё остаётся в продуктах сгорания – это углекислый газ ( $CO_2$ ). Его появления в дымовых газах невозможно избежать при сжигании ископаемых видов топлива, поскольку углерод в них является основным горючим веществом. Ввиду этого целесообразно разработать систему улавливания двуокиси углерода, чтобы полностью удалить из продуктов сгорания топлива все вредные вещества и парниковые газы.

Одним из методов улавливания углекислого газа является его карбонизация при помощи оксида кальция. Процесс протекает при реакции (1):



Данная реакция протекает при температуре  $600...700^\circ C$ , в результате чего образуется нерастворимая соль – карбонат кальция (известь). Эту соль можно вновь разложить на составляющие по реакции (2) при температуре  $900...1000^\circ C$ , таким образом осуществляя регенерацию требуемого оксида кальция:



По подсчётам такая технология позволяет улавливать до  $97...98\%$  всего углекислого газа.

На основе вышеприведенных рассуждений специалистами Итальянского технического университета была разработана экспериментальная установка на основе угольной ТЭС [5]. Результаты, полученные в процессе экспериментов, доказали эффективность предложенных технических решений. Однако приведенная в статье [5] схема также имеет определённые недостатки и уже не может считаться экологически чистой хотя бы потому, что при сжигании угля, как говорилось выше, образуется огромное количество золы и шлака. Эту и некоторые другие проблемы можно решить, если сжигать в топке котла не уголь, а природный газ. Схема котельной установки сверхкритических параметров пара, работающей на природном газе, с системой улавливания углекислого газа представлена на рисунке 1.

Воздух с помощью нагнетателя (компрессора или дутьевого вентилятора) поступает на установку сепарации воздуха, где очищается от азота и других примесей. На выходе образуется практически чистый окислитель (кислород), который подводится в воздухоподогреватель котла и затем подаётся вместе с природным газом на его горелочные устройства. В виду того, что для реакции разложения карбоната кальция (реакция (2)) нужно поддерживать высокую температуру, кислород и топливо подаются также и в специальный реактор – карбонатор, где и осуществляется эта реакция. Образующиеся дымовые газы двигаются по газоходам котла, последовательно проходя топку, ширмовый, конвективный и вторичный пароперегреватели. За этими поверхностями нагрева температура дымовых газов обычно составляет около  $500...550^\circ C$ .

Этой температуры достаточно для улавливания углекислого газа по реакции (1), поскольку образующийся в карбонаторе оксид кальция имеет температуру порядка 600...650°C. Поэтому после вторичного пароперегревателя дымовые газы направляются в кальцинатор, где и осуществляется улавливание углекислого газа по реакции (1). В результате реакции на выходе образуется карбонат кальция, который подаётся обратно в карбонатор, где вновь осуществляется его разложение. Таким образом и происходит регенерация основного реагента всей установки – оксида кальция, который переходит из карбонатора в кальцинатор, связывается с углекислым газом, затем подаётся в карбонатор, где отдаёт его и снова поступает обратно в кальцинатор. Выделяющийся в карбонаторе углекислый газ имеет достаточно высокие параметры и может быть утилизирован как низкопотенциальный энергетический ресурс в газотурбинной установке (ГТУ) на основе низкокипящих рабочих тел. Это даст возможность получить дополнительно ещё некоторое количество электрической энергии. Затем углекислый газ может быть сжижен и отправлен на промышленное производство (нефтедобыча, производство углекислоты и т.д.). Оставшиеся дымовые газы после кальцинатора проходят оставшиеся поверхности нагрева – экономайзер и воздухоподогреватель – и отводятся в дымовую трубу.

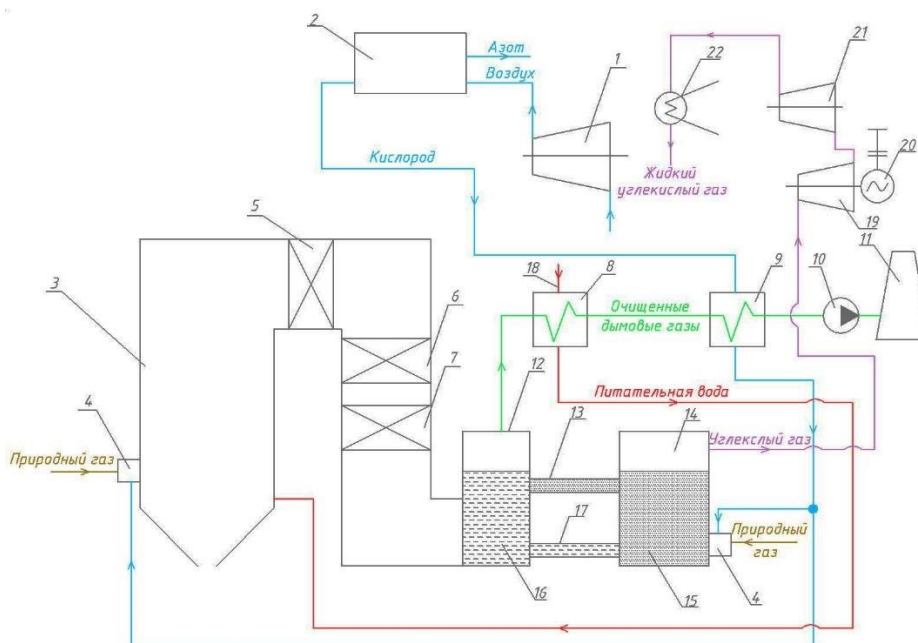


Рисунок 1 – Газовый котлоагрегат с системой улавливания углекислого газа:

1 – нагнетатель воздуха; 2 – установка сепарации воздуха; 3 – паровой котёл; 4 – горелочные устройства; 5 – ширмовый пароперегреватель; 6 – конвективный пароперегреватель; 7 – вторичный пароперегреватель; 8 – экономайзер; 9 – воздухоподогреватель; 10 – дымосос; 11 – дымовая труба; 12 – кальцинатор; 13 – патрубок подвода оксида кальция в кальцинатор; 14 – карбонатор; 15 – оксид кальция; 16 – карбонат кальция; 17 – патрубок отвода карбоната кальция из кальцинатора; 18 – подвод питательной воды после подогревателей высокого давления; 19 – ГТУ на основе низкокипящих рабочих тел; 20 – генератор; 21 – компрессор; 22 – конденсатор углекислого газа

Описанная выше схема имеет некоторые особенности. Во-первых, такая технология улавливания может быть применена только на котлах, работающих под наддувом, когда присосы воздуха в газоходах котла отсутствуют [6]. В противном случае в котёл будет присасываться воздух, содержащий азот и его оксиды, которые также могут вступить в реакцию с оксидом кальция в кальцинаторе и привести к образованию нитратов кальция, которые являются взрывоопасными и могут вывести из строя сам реактор. Во-вторых, несмотря на то, что котёл работает под наддувом, вопрос о применении дымососа остаётся открытым, поскольку кальцинатор может быть для дымовых газов участком большого аэродинамического сопротивления, что не позволит продуктам сгорания самостоятельно выйти в дымовую трубу.

### **Заключение**

Таким образом, приведенная выше котельная установка на природном газе с системой улавливания из продуктов сгорания двуокиси углерода позволяет практически полностью избавиться от вредных выбросов в атмосферу. Теоретически в дымовую трубу будут выбрасываться только несгоревшие водород, кислород, а также водяной пар. В дальнейшем планируется более детально изучить и спроектировать конструкцию реакторов установки; рассмотреть вопрос очистки дымовых газов, образующихся за счёт сжигания газа в карбонаторе; рассчитать аэродинамическое сопротивление газоздушного тракта котлоагрегата и по результатам этого расчёта подобрать соответствующее вспомогательное оборудование для подачи воздуха и отвода дымовых газов. Кроме этого, остаётся нерешённой задача очистки природного газа от азота, что могло бы позволить ещё более улучшить работу установки и сжигать в ней не только природный, но и попутный газ с содержанием азота до 10% [6].

### **Литература**

1. Matteo, R. Zecomix: a zero-emissions coal power plant, based on hydro-gasification,  $CO_2$  capture by calcium looping and high temperature steam cycle / R. Matteo, G. Lozza // *Energy Procedia*. – 2009. – № 1. – С. 1473–1480.
2. Сироткин, А.И. 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; науч. рук. Н.В. Пантелей // *Актуальные проблемы энергетики – 2023 [Электронный ресурс]: материалы студенческой научно-технической конференции / сост.: И.Н. Прокопеня, Т.А. Петровская; редкол.: Е.Г. Пономаренко (пред.) [и др.]*. – Минск: БНТУ, 2023. – С. 584–589.
3. В Техасе построят первую коммерческую ТЭС мощностью 300МВт, работающую по циклу Аллама // *Газотурбинные технологии. Специализированный информационно-аналитический журнал*. – 2022. – №6. – С. 40–42.
4. Стриха, И.И. Экологические аспекты энергетики: атмосферный воздух / И.И. Стриха, Н.Б. Карницкий. – Минск: УП «Технопринт», 2001. – 375 с.