

**УДК 621.311**

СИРОТКИН А. И., студент гр. №10604221 (БНТУ)  
Научный руководитель ПАНТЕЛЕЙ Н. В., старший преподаватель  
(БНТУ)  
г. Минск

## **РАЗРАБОТКА ТУРБИНЫ ДЛЯ РАБОТЫ СО СВЕРХКРИТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ И С РЕКУПЕРАЦИЕЙ CO<sub>2</sub>**

Вопреки значительным усилиям развитых стран по переходу к чистому и безотходному производству тепла и электричества, более половины всей энергии в настоящее время до сих пор производится на электростанциях. И, как утверждают многие учёные, в течение следующего десятилетия потребности в таких станциях будут увеличиваться. В этой связи мы считаем необходимым искать новые методы удовлетворения спроса на электроэнергию — и в то же время становиться на путь сокращения выбросов углекислого газа в атмосферу, так как последний является основной причиной парникового эффекта и, следовательно, глобального потепления. Стоит отметить, что человечество уже придумало ряд способов, позволяющих отказаться от традиционных «грязных» методов выработки энергии. Это в первую очередь создание атомных ЭС, а также солнечных, ветровых и гидроэлектростанций. За счёт различных технологий по снижению выбросов, усовершенствованию процесса горения и самого топлива в настоящее время удалось значительно продвинуться в сторону экологически чистого производства. Однако для большинства развивающихся стран эти технологии являются очень дорогими или вовсе неосуществимыми в силу географических обстоятельств. Поэтому исследования по совершенствованию циклов работы электростанций не прекращаются и по сей день. В данной статье речь пойдёт о проектировании турбины для одного из альтернативных циклов ТЭС (т.н. цикле Аллама), позволяющего почти полностью исключить выбросы углекислого газа в окружающую среду.

В 2010 году английским изобретателем Родни Алламой был разработан новый принцип работы тепловой электрической станции, позволяющий свести практически к нулю выброс углекислого газа. При этом затраты на постройку станции и её КПД остаются на уровне современных традиционных электростанций. Суть этой технологии состоит в следующем: в камеру сгорания поступают чистый кислород и природный газ, который сжигается внутри под высоким давлением (более 30 МПа). Затем смесь, состоящая преимущественно из углекислого газа и воды (в парообразном состоянии), отрабатывает в турбине и, пройдя через теплообменник, в котором конденсируется пар, попадает в сепаратор, где жидкая вода отделяется от CO<sub>2</sub>. На выходе рабочая жидкость будет представлять собой практически чистый диоксид углерода, который затем сжимается с помощью компрессора. После этого поток CO<sub>2</sub> поступает в теплообменник и выходит из него уже с высокими параметрами. Далее газ частично возвращается в камеру сгорания; это

необходимо для того, чтобы, во-первых, понизить температуру в камере сгорания до приемлемого уровня и, во-вторых, разбавить таким образом продукты сгорания. Кроме того, часть углекислого газа идёт на охлаждение газовой турбины, а остаток может смешиваться с кислородом и также направляться в камеру сгорания. Углекислый газ высокого давления может использоваться и для повышения отдачи нефтеносных пластов на месторождении. Общая схема цикла Аллама представлена на рисунке 1.

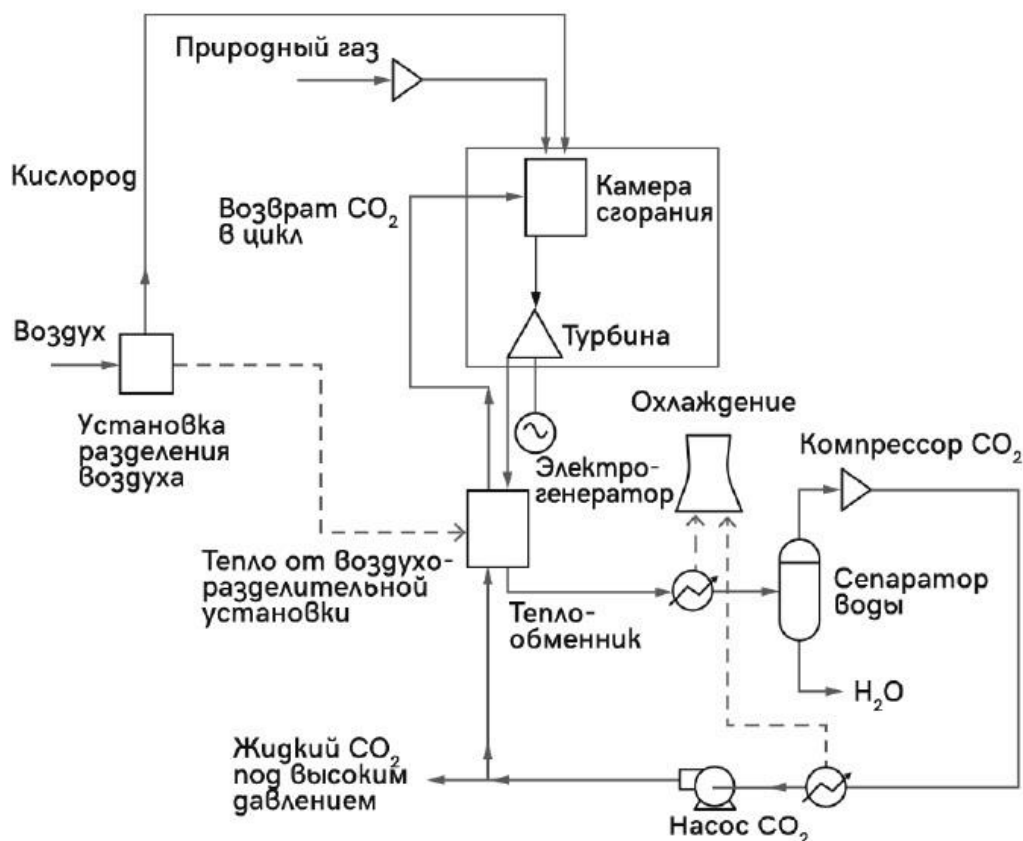


Рисунок 1. «Схема цикла Аллама»

В связи с тем, что в качестве рабочего тела в данном цикле используется двуокись углерода, стандартные турбины не подходят для реализации выбранной нами идеи. Дело в том, что параметры на входе гораздо выше по сравнению с паровыми или газовыми турбинами: они составляют соответственно 30 МПа и 1150 МПа. В результате пришлось искать конструкторов, которые могли бы реализовать подобный заказ. Компания Toshiba (Япония) уже имела опыт производства газовых турбин с низким давлением и высокой температурой на входе, а также паровых турбин с высоким давлением и относительно низкой температурой входа. Кроме того, Toshiba располагает технологиями производства форсунок и лопаток с воздушным охлаждением, что также необходимо при проектировании ГТУ. Таким образом, оставалось только объединить две технологии и создать турбину и камеру сгорания для использования CO<sub>2</sub> со сверхкритическими параметрами. Основными трудностями при разработке нового агрегата стали:

- правильный и рациональный подбор материалов;
- альтернативные технологии охлаждения в условиях теплового потока высокой плотности;
- стабильность горения.

На рисунке 2 представлены турбина и камера сгорания мощностью 25 МВт.

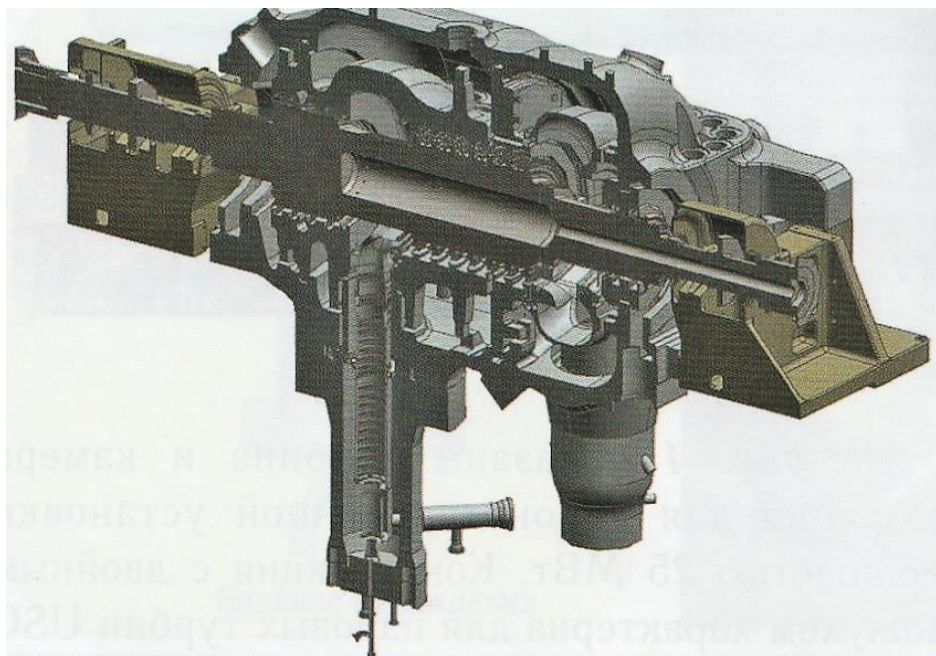


Рисунок 2. Турбина sCO<sub>2</sub> мощностью 25 МВт и камера сгорания

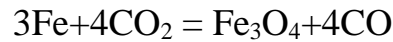
Так как температура рабочего тела в турбине достаточно высока, при её производстве необходимо было использовать жаропрочные, износостойкие и прочные металлы. Ниже приведена сводная таблица материалов, используемых при изготовлении турбины.

Таблица 1. Металлы, используемые при создании частей турбины

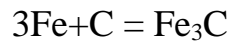
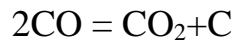
часть турбины	используемые металлы
наружный корпус	хром, молибден, ванадий
внутренний корпус	никель, хром, молибден, ванадий
лопатки	никель
форсунки	кобальт
роотор	хром, молибден, ванадий

В данный момент уже разработаны технологии, позволяющие создавать достаточно большие детали (корпуса турбины) на основе никелевых суперсплавов, а также технологии сварки — как дляковки, так и для литья.

Однако, несмотря на достаточный багаж знаний, при проектировании данной турбины возникла опасность того, что металл, из которого изготовлены непосредственно контактирующие с рабочим телом компоненты турбины, может начать окисляться под воздействием углекислого газа по следующей реакции (на примере железа):



При этом образующийся в таком случае монооксид углерода будет также химически реагировать, а на выходе получится чистый углерод, который также способен взаимодействовать с металлами:



Высокая температура будет только способствовать протеканию этих реакций. Для более подробного исследования был создан специальный стенд, с помощью которого необходимо было определить скорость протекания этих реакций и возможный ущерб от них. Испытания в компании Toshiba ещё продолжаются, однако уже сейчас имеются промежуточные результаты, показывающие, что применяемые при создании турбины металлы и суперсплавы имеют достаточно высокую стойкость по отношению к окислителям (по сравнению, например, со сплавами на основе железа).

Ещё одна проблема, связанная со свойствами углекислого газа, заключается в его высокой удельной теплоёмкости. При температуре 1150°C она отличается от теплоёмкости водяного пара в 1,4 раза. Из-за этого, а также из-за достаточно высокого давления, тепловой поток в турбине и камере сгорания был намного выше, чем в обычных ГТУ. Поэтому конструкторам пришлось проводить испытания по созданию специального термобарьерного покрытия, способного выдерживать такие нагрузки. В результате испытаний в объёме, эквивалентном ежедневным пускам и остановкам в течение трёх лет, покрытие проявило себя с положительной стороны.

Охлаждение лопаток и форсунок в рассматриваемой конструкции представлено в традиционном ключе: в них имеются отверстия и каналы. Туда подают  $\text{CO}_2$  с низкими параметрами, который непосредственно и охлаждает необходимые детали.

Если при проектировании турбины у инженеров были наработки и основа для создания нового образца техники, то в случае с камерой сгорания были необходимы полномасштабные научные исследования и испытания, чтобы определить её оптимальную конструкцию. Специально для этой цели был создан стенд с уже подготовленными газами ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2$  для продувки и регулирования давления на выходе). Хотя из-за ограниченности газов каждое конкретное испытание длилось не более 3 минут, в итоге был получен достаточный объём информации и знаний. После этого камеру сгорания полностью разобрали на запчасти и проверили каждую деталь. Никаких дефектов и нарушений обнаружено не было. Кроме того, было проведено также компьютерное моделирование тепловых потоков, результаты которого дали возможность скорректировать внутреннюю структуру и компоновку камеры сгорания. Интересной особенностью в этом случае является необходимость

использования блока лазерного зажигания, так как применять в конструкции обычные свечи невозможно из-за снижения характеристик искрообразования при гораздо более высоком давлении, чем у обычных газовых турбин.

Таким образом, компания Toshiba разработала турбину и камеру сгорания для цикла с рекуперацией углекислого газа сверхкритических параметров. Данная разработка дала возможность начать строить в Техасе (США) полноценную коммерческую ТЭС, работающую по циклу Аллама, мощностью 300 МВт. Ввод её в эксплуатацию планируется в 2026 году.

#### Список литературы:

1. International Energy Agency. World Energy Outlook. 2021
2. Такаши Сасаки Турбина и камера сгорания для работы со сверхкритическими параметрами с рекуперацией CO<sub>2</sub> // Турбины и дизели. - 2022. - №6. - С. 16-20
3. Костюк А.Г., Фролов В.В., Булкин А.Е., Трухний А.Д. Паровые и газовые турбины для электростанций. - 4-е изд. - 2016: МЭИ