

# ТЭЦ без выхлопа CO<sub>2</sub> в атмосферу

Наша страна, как и большинство ведущих зарубежных стран все больше уделяет внимание борьбе с антропогенными выбросами в атмосферу парниковых газов, в том числе CO<sub>2</sub>. Один из основных источников выбросов углекислого газа связан с производством электрической и тепловой энергии. Несмотря на большие усилия, направленные на развитие технологий возобновляемых источников энергии, органическое топливо еще долго будет доминировать в энергетике. Поэтому улавливание CO<sub>2</sub>, образовавшегося при сгорании органического топлива, приобретает особую значимость.



К.т.н., старший научный сотрудник ОИВТ РАН  
Михаил Всеволодович Синкевич

Эта тематика стала приоритетной в работе Совета по приоритетному направлению научно-технологического развития Российской Федерации «Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирования новых источников, способов транспортировки и хранения энергии», который возглавляет академик Сергей Петрович Филиппов, директор Института энергетических исследований РАН. На одном из последних заседаний Советом рассмотрена и поддержана заявка на комплексный научно-технический проект полного инновационного цикла (КНТП) «Создание бескомпрессорной парогазовой установки с внутрицикловым улавливанием CO<sub>2</sub> в жидкой фазе (ТЭЦ без выбросов)», нацеленный на разработку и промышленное освоение новой экономически доступной технологии производства электроэнергии, с значительным уменьшением выбросов парниковых газов в атмосферу. КНТП предполагает создание первой в России энергетической установки мощностью 60 МВт на сверхкритическом диоксиде углерода.

Коэффициент полезного действия (КПД) лучших энергетических парогазовых установок (ПГУ) уже превышает 60%. Но, учитывая место, которое занимает энергетика в жизнедеятельности человечества, требования к энергетическим установкам постоянно растут. Имеются еще существенные резервы повышения эффективности использования топлива за счет совместной выработки электроэнергии и тепла с одновременным выполнением жестких экологических требований. Ведется поиск новых циклов и схем, позволяющих сократить выбросы в атмосферу образовавшегося в результате сгорания топлива углекислого газа. Один из таких циклов и схема, реализующая его, предложен сотрудниками ОИВТ РАН.

При разработке этого цикла акценты были расставлены следующим образом: в первую очередь, рассматривалась возможность обеспечения вывода CO<sub>2</sub> из цикла электростанции в жидком виде – наиболее удобном для хранения, транспортировки и дальнейшего полезного использования. Как показал анализ, такое решение относительно просто и эффективно реализуется технически при организации сжигания органического топлива в кислороде, что одновременно обеспечивает и меньшие затраты на



Д.т.н., заведующий отделом проблем теплоэнергетики ОИВТ РАН  
Александр Семёнович Косой



Д.т.н., главный научный сотрудник ОИВТ РАН  
Олег Сергеевич Попель

извлечение CO<sub>2</sub>, чем это требуется при известных способах его извлечения из газообразных продуктов сгорания, выбрасываемых в трубу. Вторым акцентом был сделан на разработку термодинамического цикла, обеспечивающего высокую эффективность совместного производства электрической и тепловой энергии, что особенно важно для климатических условий большинства регионов России. При этом внимание уделялось и обеспечению приемлемого КПД в случае генерации только электрической энергии.

Технология «кислородного сжигания топлива» активно разрабатывается рядом энергетических компаний в мире. Эта технология предусматривает предварительное разделение воздуха с выделением относительно чистого кислорода, в котором происходит сжигание топлива. Требуемая температура на выходе из камеры сгорания обеспечивается за счет рециркуляции отработавших в цикле продуктов сгорания (CO<sub>2</sub> и/или H<sub>2</sub>O). Циклы, использующие эту технологию, являются ползамкнутыми. Большая часть рабочего тела, представляющего собой смесь CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O, циркулирует внутри цикла. Частично идет пополнение рабочего тела за счет сжигания топлива в окислителе. Температуры конденсации CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O отличаются друг от друга, поэтому их легко разделить и избытки CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O в разделенном виде вывести из цикла. Технология кислородного сжигания топлива лежит в основе предложенного цикла ОИВТ.

При совместном производстве электрической и тепловой энергии исключительно большое значение имеет возможность гибкого регулирования их отпуска в соответствии с графиками потребления электрической и тепловой энергии, которые, как правило, не

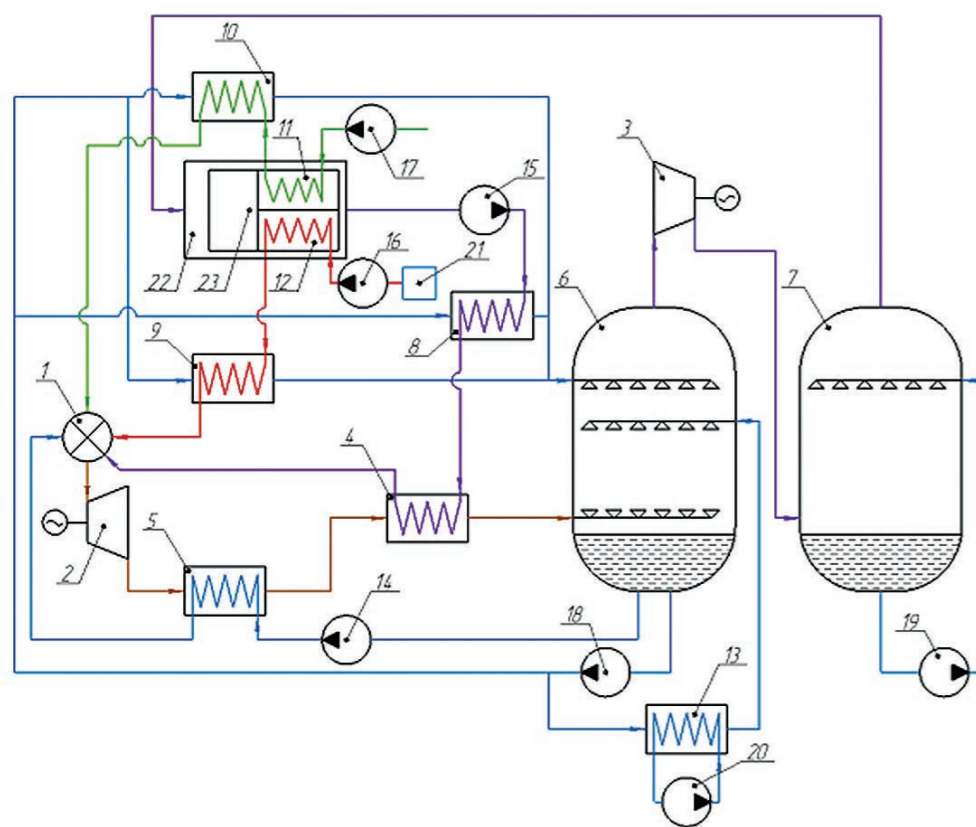
совпадают. Если генерирующая установка не имеет возможности независимой генерации, то дополнительно приходится использовать малоэффективные установки отдельной генерации, которые будут согласовывать графики потребления и генерации.

Проведенные исследования показали, что при постоянных параметрах цикла (температуре и давлении на входе в турбину, степени расширения в турбине) соотношение генерируемых электрической и тепловой энергии сильно зависит от соотношения CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O в потоке рециркуляции. Поэтому в схеме ОИВТ CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O подаются в камеру сгорания отдельно и имеют возможность независимого регулирования. Это несколько усложняет систему регулирования установки (предусматривается независимое регулирование подачи четырех компонентов - CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O), но при этом появляется и четыре степени свободы, что обеспечивает возможность регулировать в широком диапазоне генерацию требуемых в данный момент времени электрической и тепловой мощностей при сохранении номинальной температуры рабочего тела на входе в турбину и минимально необходимого избытка окислителя. Поддержание на всех рабочих режимах номинальной температуры рабочего тела на входе в турбину и минимально необходимого избытка окислителя обеспечивает высокую топливную эффективность во всем эксплуатационном диапазоне генерирующего объекта.

Для упрощения регулирования подачи компонентов рабочего тела в камеру сгорания предложено отказаться от компрессоров для повышения давления этих компонент. Дело в том, что компрессоры потребляют относительно большую мощность привода и



Принципиальная схема энерготехнологического комплекса с бескомпрессорной ПГУ для шахт



**Расчетная схема:**  
 1 – камера сгорания, 2 – турбина, 5 – компрессор CO<sub>2</sub>, 4 – рекуператор CO<sub>2</sub>, 5 – рекуператор H<sub>2</sub>O, 6 – контактный конденсатор низкого давления, 7 – контактный конденсатор высокого давления, 8 – подогреватель CO<sub>2</sub>, 9 – подогреватель кислорода, 10 – подогреватель топлива, 11 – утилизатор холода кислорода, 12 – утилизатор холода топлива, 13 – подогреватель сетевой воды, 14 – насос питательной воды, 15 – насос CO<sub>2</sub>, 16 – насос кислорода, 17 – насос топлива, 18 – насос внутреннего циркуляционного контура низкого давления, 19 – насос внутреннего циркуляционного контура высокого давления, 20 – насос сетевой воды, 21 – ВРУ, 22 – устройство ожигения CO<sub>2</sub>, 23 – холодильная установка устройства ожигения CO<sub>2</sub>.

**Обозначения линий на расчётной схеме:**  
 — трубопроводы и арматура H<sub>2</sub>O,  
 — трубопроводы и арматура O<sub>2</sub>,  
 — трубопроводы и арматура CO<sub>2</sub>,  
 — трубопроводы и арматура CH<sub>4</sub>,  
 — трубопроводы и арматура продуктов сгорания.

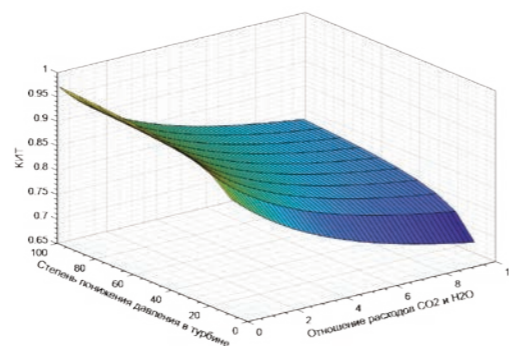
имеют большие зоны неустойчивой работы. Эти недостатки значительно меньше присущи насосам. Поэтому, в цикле ОИВТ перед повышением давления для подачи в камеру сгорания, все четыре исходные части рабочего тела переводятся в жидкую фазу (чтобы подчеркнуть это решение в начальных публикациях авторы использовали название «бескомпрессорная ПГУ»). Безусловно, на перевод в жидкую фазу требуются затраты энергии, но они, с одной стороны, компенсируются уменьшением работы повышения давления, а с другой стороны, исходное состояние топлива и кислорода могут быть изначально жидкими. После повышения давления холод низкокипящих компонентов (CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>) может быть использован для ожигения выше кипящих компонентов (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O), тем самым уменьшая затраты энергии. На последующих стадиях проектирования система получения исходных жидких продуктов может быть основательно оптимизирована.

Есть множество причин, по которым может потребоваться генерация только электрической энергии. В этом случае важно, чтобы разрабатываемая энергоустановка при генерации только электрической энергии имела КПД не уступающий альтернативным генерирующим установкам. Высокий КПД предлагаемого цикла достигается за счет рекуперации тепла отработавшего в турбине рабочего тела. Предлагаемый цикл ОИВТ и реализующая его схема предполагает развитую систему теплообменного оборудования. Эффек-

тивность этого теплообменного оборудования будет играть ключевую роль в достижении высокого КПД.

Расчетные исследования показали, что цикл ОИВТ позволяет достичь весьма высоких показателей топливной экономичности. Даже при относительно умеренной температуре рабочего тела перед турбиной (1373 К) КПД по отпуску электроэнергии может достигать 46,5 %, а коэффициент использования топлива (КИТ) – 95 % (отнесенные к высшей теплотворной способности топлива).

Изменяя соотношение компонентов рабочего тела, подаваемых в камеру сгорания, можно при постоянной электрической мощности изменять тепло-

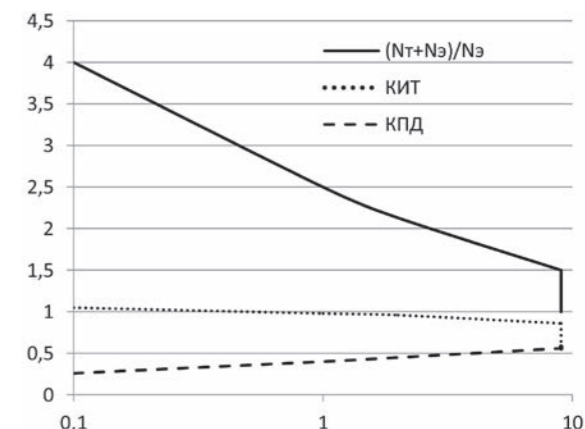


**Зависимость КИТ от степени понижения давления в турбине и соотношения расходов CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O**

вую мощность так, что максимальная тепловая мощность будет превышать минимальную более чем в шесть раз. При этом КИТ будет во всем диапазоне достаточно близок к единице. Такой диапазон регулирования тепловых нагрузок обеспечивает возможность круглогодичного снабжения теплом потребителей без дополнительных пиковых котельных. И эффективную работу летом, обеспечивая только горячее водоснабжение, и в зимний период, покрывая все потребности тепла в самые холодные дни. Отказ от дополнительных пиковых котельных уменьшит как капитальные затраты на строительство, так и эксплуатационные расходы.

Анализ эффективности работы в системах централизованного теплоснабжения показал их высокий потенциал возможного использования в таких системах. При принятой эксплуатационной модели системы централизованного теплоснабжения годового перерасхода топлива (превышение минимального теоретически возможного) составляет менее 20%, тогда как для лучших ПГУ эта величина доходит до 25%, а для паровых турбин – более 35%.

Хорошие перспективы предлагаемые энергетические установки имеют при их использовании в составе энерготехнологических комплексов. Предлагаемый цикл ОИВТ обеспечивает возможность производства и поставки помимо механической (электрической) энергии, тепла и холода, еще как минимум трех востребованных «продуктов» – вода/пар, CO<sub>2</sub>, кислород и др.), что открывает возможности оптимизации цикла ОИВТ применительно к различным технологическим комплексам химической и строительной индустрии, которые, как правило, помимо электроэнергии и тепла нуждаются в потреблении значительного количества воды и в ряде случаев углекислого газа (производство удобрений, пластмасс, карбонизированных



**Зависимость КПД, КИТ и отношения общей генерируемой мощности к электрической от отношения расхода CO<sub>2</sub> к расходу H<sub>2</sub>O (логарифмическая шкала)**

строительных материалов и т.п.). При этом важной отличительной особенностью предлагаемой энергоустановки является ее способность аккумулировать энергию и другие «продукты» при временном снижении их потребления, а также возможность работы не только на природном газе, но и на СПГ, шахтном метане и других органических топливах.

В настоящее время готовится предложение о КНТП «Создание бескомпрессорной парогазовой установки с внутрцикловым улавливанием CO<sub>2</sub> в жидкой фазе», которое будет направлено в Минобрнауки России для представления на рассмотрение в Правительство РФ. Разработчики и научное сообщество надеются на поддержку Правительством РФ данного проекта и незамедлительного начала строительства первой в России ТЭЦ без выбросов углекислого газа.

**Сравнение бескомпрессорной ПГУ (БкПГУ) с современными ПГУ**

Показатель	ПГУ-325	ПГУ-450Т	ПГУ-800	ПГУ лучший мировой	БкПГУ 60 МВт Пилотный образец	БкПГУ 600 МВт Коммерческая электростанция
<b>Производство только электроэнергии</b>						
Мощность электрическая, МВт	325	450	808	600	60	600
КПД без учета затрат на улавливание CO <sub>2</sub> , %	51,7	51	54,6	62,2	50	54
Затраты энергии на улавливание CO <sub>2</sub> , %	10-15	10-15	10-15	10-15	1,5	1,5
Доля уловленного CO <sub>2</sub> , %	90	90	90	90	~100	~100
КПД с учетом затрат на улавливание CO <sub>2</sub> , %	36,7-41,7	36-41	39,6-44,6	47,2-52,2	48,5	52,5
<b>Совместное производство электричества и тепла</b>						
Условный относительный годовой расход топлива <sup>[1]</sup> без учета затрат на улавливание CO <sub>2</sub>	0,94	0,945	0,92	0,87	0,88	0,85
Условный относительный годовой расход топлива <sup>[2]</sup> с учетом затрат на улавливание CO <sub>2</sub>	1,05-1,1	1,05-1,1	1,03-1,08	0,98-1,03	0,89	0,86

[1] Годовой расход топлива, отнесенный к условному эталону. За условный эталон принята теплофикационная паротурбинная установка Т-250/300-240. Все варианты и условный эталон приведены к равным условиям (установки приведены к равной номинальной мощности, генерируют одинаковое количество энергии с одинаковым температурным графиком).

[2] Условный эталон не корректировался на улавливание CO<sub>2</sub>.