

# ЦИКЛ ОИВТ РАН С КИСЛОРОДНЫМ СЖИГАНИЕМ ТОПЛИВА ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Кандидат технических наук **А.С. КОСОЙ**,  
доктор технических наук **О.С. ПОПЕЛЬ**,  
кандидат технических наук **М.В. СИНКЕВИЧ**,  
(ОИВТ РАН)

Поступила в редакцию 04.11.2025  
Принята к публикации 14.12.2025

Описан принцип работы энергетической установки на новом термодинамическом цикле с кислородным сжиганием природного газа (цикл ОИВТ РАН), обеспечивающем эффективное комбинированное производство электроэнергии и тепловой энергии с кардинальным сокращением вредных выбросов в атмосферу. Дана характеристика уникальных особенностей таких энергоустановок, определяющих их высокую привлекательность для решения актуальных задач модернизации энергетики России при длительном сохранении высокой доли ископаемых топлив в энергетическом балансе страны, с учётом особенностей начавшегося в мировой энергетике энергетического перехода.

## Введение

**П**ринципиальные требования IV энергетического перехода, обозначившегося в последние два десятилетия в мировой энергетике, – повышение эффективности производства и

потребления развивающейся экономикой энергии и сокращение в этих процессах экологически вредных выбросов. При этом основной тренд развития энергетики многих развитых стран мира – сокращение потребления органических топлив с переходом на ис-

пользование более экологически чистых возобновляемых источников энергии (ВИЭ), сочетающихся в перспективе с водородными энергетическими технологиями, потенциально обеспечивающими стабильность энергоснабжения потребителей от стохастических генераторов на ВИЭ и постепенный переход к "водородной экономике"<sup>1</sup>. Декларируемая международными соглашениями необходимость декарбонизации энергетики с целью сокращения выбросов в атмосферу парниковых газов для предотвращения негативных процессов изменения климата<sup>2</sup> стимулирует также интенсивное развитие технологий CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage)<sup>3</sup>, ориентированных на извлечение, использование и захоронение углекислого газа, образующегося при сжигании органических топлив.

Озабоченность России возможными негативными последствиями изменения климата отражена в Указе Президента РФ от 26 октября 2023 г. № 812 "Об утверждении Климатической доктрины РФ", в котором сформулирована цель достижения Россией углеродной нейтральности к 2060 году, в Распоряжении Правительства РФ от 29.10.2021 № 3052-р "Об утверждении стратегии социально-эконо-

мического развития РФ с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г." и в ряде других директивных документов. Перед Россией ставится задача выбора наиболее приемлемых вариантов стратегического развития ответственного энергокомплекса с учётом природно-климатических особенностей страны, её сырьевых, технологических, финансовых и иных возможностей.

В соответствии с мировыми трендами, в последние годы в стране уделяется большое внимание развитию экологически чистой возобновляемой энергетики. Однако прогнозные исследования<sup>4</sup> показывают, что органическое топливо в российской энергетике в обозримом будущем останется преобладающим. Впрочем, ранее сформулированные рядом зарубежных стран радужные планы кардинального снижения масштабов расхода органических топлив в энергетике за счёт перехода к середине текущего столетия на ВИЭ и водород уже ставятся под сомнение, поскольку при заявленных высоких темпах перехода к масштабному использованию нестабильных ВИЭ возникают технологические трудности и требуются непомерно высокие затраты<sup>5</sup>. Очевидно, что в обозримом будущем органические топлива останутся основным видом первичных источников энергии и в мировой энергетике.

<sup>1</sup> *The Vision of a Global Hydrogen Economy*. <https://policycommons.net/artifacts/28084034/the-vision-of-a-global-hydrogen-economy/28983887>

<sup>2</sup> IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report*. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35–115, DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

<sup>3</sup> Рябов Г.А. Технологии улавливания диоксида углерода на ТЭС, его транспортировка, полезное использование и захоронение // *Экология, энергетика, энергосбережение*, вып. 3. М.: ПАО "Мосэнерго", 2022. 32 с. ISBN 978-5-383-01649-7. <https://www.mosenergo.ru/d/textpage/45/837/03-uglekislyj-gaz.pdf>

<sup>4</sup> *Прогноз развития энергетики мира и России 2024* / под ред. А.А. Макарова, В.А. Кулагина, Д.А. Грушевенко, А.А. Галкиной. М.: ИНЭИ РАН, 2024. 207 с. ISBN 978-5-91438-038-7. <https://www.eriras.ru/prognoz-2024>

<sup>5</sup> *Transitioning to Renewable Energy: Challenges and opportunities*. <https://iee.psu.edu/news/blog/transitioning-renewable-energy-challenges-and-opportunities>

Отметим также, что в России приоритетность использования органических топлив во многом связана с необходимостью выработки значительных объёмов тепловой энергии, потребность в которой в среднем по стране более чем в 2 раза превышает потребность в электроэнергии. Энергокомплексы большинства крупных городов страны ежегодно вырабатывают существенно больше тепла, чем электричества. Кроме того, следует учитывать, что при сжигании топлива на 1 т содержащегося в нём углерода выделяется около 3.3 т  $\text{CO}_2$ , и при сохранении тренда развития мировой и отечественной энергетики с акцентом на сокращение выбросов парниковых газов в атмосферу улавливание, транспортировка и захоронение  $\text{CO}_2$  потребует значительных энергетических и финансовых затрат.

В настоящее время наиболее широко применяются технологии улавливания  $\text{CO}_2$  из дымовых газов с помощью абсорбционных систем на основе аминов. Однако доля  $\text{CO}_2$  в продуктах сгорания современных энергетических установок в зависимости от состава топлива – всего 3–5%. Выделение  $\text{CO}_2$  с такой низкой концентрацией и низким парциальным давлением – дорогая и энергоёмкая задача. По оценкам экспертов, оснащение тепловых электростанций абсорбционными системами увеличивает удельные капитальные вложения в 1.6–2.3 раза, а стоимость электроэнергии – в 1.4–1.6 раза. На собственные нужды таких систем необходимо будет затратить от 9 до 20% мощности станции (см. сноску 3).

В этой связи задача разработки новых экологически чистых технологий производства электроэнергии и тепла, основанных на сжигании природных топлив, приобретает особое значение. Актуальной становится задача повышения энергоэффективности как на стадии генерации электроэнергии и тепла, так и на стадиях улавливания, транспортировки и утилизации  $\text{CO}_2$ . Необходима разработка усовершенствованных термодинамических циклов преобразования энергии, обеспечивающих высокий КПД преобразования химической энергии топлива в электричество и тепло с учётом переменных суточных и сезонных графиков электрической и тепловой нагрузки, а также снижение энергозатрат на улавливание и транспортировку  $\text{CO}_2$  для его последующего использования в химической, нефтегазовой промышленности, промышленности строительных материалов или захоронения.

Сложность и дороговизна извлечения  $\text{CO}_2$  после сгорания топлива в традиционных циклах энергоустановок стимулировали разработку новых методов (см. сноску 3):

- улавливание  $\text{CO}_2$  “перед сжиганием” с предварительной внутрицикловой газификацией топлива;

- улавливание  $\text{CO}_2$  в химических циклах с помощью кальциевых соединений или высокотемпературных циклов с оксидами металлов в качестве кислородных носителей;

- сжигание топлива в кислороде (“oxy-fuel”), позволяющее эффективно выделять из продуктов

сгорания практически чистый поток смеси  $\text{CO}_2$  с водяным паром, которые затем можно легко разделить, используя различие теплофизических свойств.

Перечисленные методы находятся на различных стадиях экспериментальной апробации, но самым перспективным для практического применения в энергетике представляется метод кислородного сжигания топлива.

### Технологии кислородного сжигания топлива

История кислородного сжигания топлива<sup>6</sup> берёт начало в металлургии и сварочных технологиях и связана с необходимостью получения высоких температур. Высокая температура была целью и в ракетных двигателях. Ещё в начале XX века К.Э. Циолковский предложил сжиженные водород и кислород в качестве ракетного топлива. Сегодня в кислороде сжигают и другие ракетные топлива, одним из наиболее перспективных считается сжиженный метан<sup>7</sup>.

Использование технологии "oxy-fuel" в энергетике известно с 30-х годов прошлого сто-

<sup>6</sup> Синкевич М.В., Косой А.А., Косой А.С., Попель О.С. Технологии кислородного сжигания топлива – будущие технологии экологически чистой энергетики // Экология, энергетика, энергосбережение, вып. 2. М.: ПАО "Мосэнерго", 2024. 36 с. ISBN 978-5-383-01713-5. <https://www.mosenergo.ru/d/textpage/45/837/vypusk-2-2024.pdf>

<sup>7</sup> Жидкостный ракетный двигатель. <https://avia.pro/blog/zhidkostnyy-raketnyy-dvigatel>

летия, когда в СССР был реализован проект подводной лодки с двигателем внутреннего сгорания, работающим на кислороде. По проекту С.А. Базилевского

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ "OXY-FUEL" В ЭНЕРГЕТИКЕ ИЗВЕСТНО С 30-Х ГОДОВ ПРОШЛОГО СТОЛЕТИЯ, КОГДА В СССР БЫЛ РЕАЛИЗОВАН ПРОЕКТ ПОДВОДНОЙ ЛОДКИ С ДВИГАТЕЛЕМ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ, РАБОТАЮЩИМ НА КИСЛОРОДЕ.

была построена силовая установка, способная работать на воздухе в надводном положении и на кислороде под водой. Жидкий кислород запасался в криогенной ёмкости бортовой воздухо-разделительной установкой при всплытии лодки на поверхность. Под водой в двигатель вместе с кислородом и топливом подавался углекислый газ из выхлопа, что обеспечивало необходимое регулирование температуры горения топлива<sup>8</sup>. В настоящее время отечественные разработки "oxy-fuel"-турбин для подводных аппаратов проводятся в АО Санкт-Петербургское морское бюро машиностроения "Малахит"<sup>9</sup>.

В конце XX века в Одесском технологическом институте пи-

<sup>8</sup> Половинкин В.Н., Федулов С.В., Титушкин С.И., Соловьев Д.Н. Регенеративный единый двигатель особого назначения для подводных лодок С.А. Базилевского // Морские интеллектуальные технологии 2022. Т. 1. № 1. С. 63–69. DOI:10.37220/MIT.2022.55.1.008. [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_48221926\\_48617989.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_48221926_48617989.pdf)

<sup>9</sup> В "Малахите" рассказали о газотурбинной ВНЭУ замкнутого цикла. <https://web.archive.org/web/20191210023756/https://flotprom.ru/2019/%D4%EE%F0%F3%EC%0%F0%EC%E8%FF36/>; интернет-журнал "Военное обозрение". Флот. Концепт-проект неатомной Подлодки П-750Б "Сервал", 20 августа 2020, <https://podwar.ru/174264-koncept-proekt-neatomnoj-podlodki-p-750b-serval.html>

щевой и холодильной промышленности активно исследовалась работа турбин с различными рабочими телами, в том числе на смеси  $\text{CO}_2$  (80–85%) и водяного пара (15–20%) в качестве рабочего тела термодинамического цикла силовой энергоустановки.

В XXI веке работы по “oxy-fuel” для энергетики активизировались как в России, так и за рубежом. За последнюю четверть века в России получено более сотни патентов по этой тематике. Самые активные работы, судя по патентодержателям, проходили в уже упомянутом “Малахите”, в Военном инженерно-космическом университете им. А.Ф. Можайского, в Новосибирском государственном техническом университете, в Институте энергетических исследований РАН, НИУ “МЭИ” и в Объединенном институте высоких температур РАН. В последнем была создана уникальная технологическая схема термодинамического цикла теплофикационной установки с полным улавливанием углекислого газа в жидком виде, известная в научной литературе как “цикл ОИВТ РАН” или “БКПГУ” (бескомпрессорная парогазовая установка)<sup>10</sup>.

Следует отметить, что разработки технологии “oxy-fuel” для крупной электроэнергетики активно ведутся в США на осно-

<sup>10</sup> Способ и установка для выработки механической и тепловой энергии. Патент РФ № 2651918 МПК F02C 3/00 / Косой А.С., Попель О.С., Синкевич М.В. / Патентообладатель: ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН. Заявка № 2017121199, 16.06.2017. Оpubл. 24.04.2018. Бюл. № 12

ве так называемого “цикла Аллама”<sup>11</sup>.

Компанией Net Power Inc. в Техасе в 2016 году создан экспериментальный стенд для обработки энергоустановки мощностью 50 МВт, завершено проектирование электростанции Project Permian в Техасе мощностью 300 МВт и в Северной Калифорнии начато проектирование электростанции Carbon TerraVault&Net Power мощностью 1 ГВт<sup>12</sup>. Принципиальное отличие цикла ОИВТ РАН от цикла Аллама состоит в том, что разработка ОИВТ РАН ориентирована на комбинированное производство электроэнергии и тепловой энергии (ТЭЦ), в то время как цикл Аллама обеспечивает возможность экологически чистого производства только электроэнергии.

### **Высокоэффективная экологически чистая теплофикационная энергоустановка по циклу ОИВТ РАН**

Принципиальная схема энергоустановки по циклу ОИВТ РАН представлена на рисунке. В качестве топлива используется сжиженный природный газ

<sup>11</sup> Allam R.J., Palmer M.R., Brown G.W., Fetvedt J., Freed D., Nomoto H., et al. High efficiency and low cost of electricity generation from fossil fuels while eliminating atmospheric emissions, including carbon dioxide // *Energy Procedia*, 2013. Vol. 37. P. 1135–49. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.egypro.2013.05.211

<sup>12</sup> NET Power and CRC Team to Deploy 1 GW of Carbon-Free Gas Power Plants in California // *Power*. December 11, 2024. <https://www.powermag.com/net-power-and-crc-team-to-deploy-1-gw-of-carbon-free-gas-power-plants-in-california>

(СПГ), окислителем служит жидкий кислород. Рабочее тело в парогазовой турбине (11) – высокотемпературная смесь водяного пара и  $\text{CO}_2$ , образующаяся в камере сгорания (10) при кислородном сжигании топлива. Температура парогазовой смеси на выходе из камеры сгорания поддерживается (путём подачи в неё смеси  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) на уровне около  $1100^\circ\text{C}$  (на первом этапе рассматриваются температуры, не требующие сложных систем охлаждения турбины). В рабочем теле могут присутствовать в малых количествах другие (“неконденсируемые”) газы (азот, не прореагировавший кислород и др.), поступающие с кислородом и СПГ, которые впоследствии удаляются из цикла в конденсаторе (5). Для регулирования параметров рабочего тела в камеру сгорания могут подаваться дополнительные количества  $\text{CO}_2$  и/или водяного пара.

Парогазовая смесь после камеры сгорания (10) расширяется в турбине (11) с начального давления около 30 МПа до 0.5–0.8 МПа. Такой значительный перепад давления обеспечивает высокую удельную мощность установки. После рекуперативных теплообменников (12, 13) парогазовая смесь поступает в контактный теплообменник (17) для конденсации и удаления воды. Из теплообменника (17) выходит углекислый газ с незначительным количеством водяного пара. Далее углекислый газ сжимается в

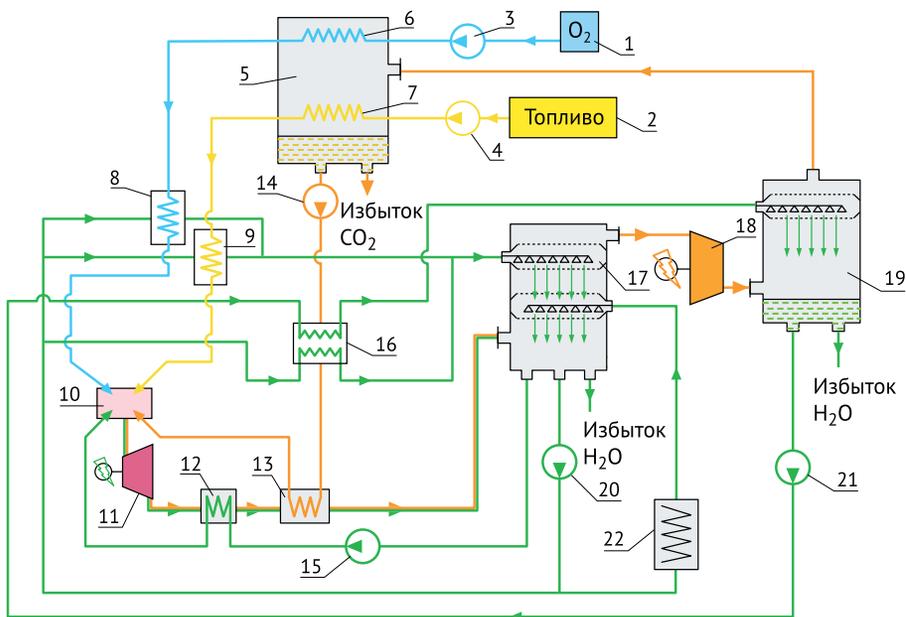
компрессоре (18) до давления 3.2–3.5 МПа. При таком давлении в конденсаторе (19)  $\text{CO}_2$  практически полностью осушается. Затем газ направляется в конденсатор  $\text{CO}_2$  (5), где при температуре, близкой к  $0^\circ\text{C}$ , происходит его фазовый переход в жидкость.

В XXI ВЕКЕ РАБОТЫ ПО “OXY-FUEL” ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ АКТИВИЗИРОВАЛИСЬ КАК В РОССИИ, ТАК И ЗА РУБЕЖОМ. ЗА ПОСЛЕДНЮЮ ЧЕТВЕРТЬ ВЕКА В РОССИИ ПОЛУЧЕНО БОЛЕЕ СОТНИ ПАТЕНТОВ ПО ЭТОЙ ТЕМАТИКЕ.

Практическое отсутствие водяного пара в подаваемом в конденсатор  $\text{CO}_2$  позволяет сконденсировать его без обмерзания теплообменных поверхностей.

После рекуператоров (12, 13) нагретые  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  поступают в камеру сгорания (10). Их количество регулируется для поддержания заданной температуры рабочего тела на входе в турбину (11).  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  конденсируются в конденсаторах (17, 19, 5) под повышенным давлением. Избытки  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  выводятся из цикла в жидком состоянии.

Отметим, что для упрощения представленной на рисунке схемы в неё не включена криогенная воздухоразделительная установка (ВРУ), обеспечивающая получение кислорода в жидком виде и ожижение природного газа. Для её работы тратится часть электрической энергии, генерируемой энергоустановкой. Расчёты показывают, что для энергоустановки установленной мощностью на уровне 100–300 МВт ВРУ потребляет до 14% вырабатываемой электрической энергии, и это



Принципиальная схема энергетической установки по циклу ОИВТ РАН

- 1 – источник жидкого кислорода;
- 2 – источник жидкого топлива;
- 3 – насос-регулятор кислорода;
- 4 – насос-регулятор топлива;
- 5 – конденсатор диоксида углерода;
- 6 – теплообменник-утилизатор холода кислорода;
- 7 – теплообменник-утилизатор холода топлива;
- 8 – рекуперативный теплообменник подогрева кислорода;
- 9 – рекуперативный теплообменник подогрева топлива;
- 10 – камера сгорания;
- 11 – парогазовая турбина с турбогенератором;
- 12 – рекуперативный теплообменник подогрева воды (утилизационный котёл);
- 13 – рекуперативный теплообменник подогрева углекислого газа;
- 14 – насос-регулятор диоксида углерода;
- 15 – насос-регулятор воды;
- 16 – теплообменник-утилизатор холода диоксида углерода;
- 17 – конденсатор воды низкого давления;
- 18 – компрессор углекислого газа с приводным двигателем;
- 19 – конденсатор воды высокого давления;
- 20 – насос циркуляционный конденсатора воды низкого давления;
- 21 – насос циркуляционный конденсатора воды высокого давления;
- 22 – теплообменник устройства охлаждения воды

с лихвой компенсируется экономией энергии за счёт повышения давления компонентов рабочего тела в жидком виде насосами вместо компрессоров. При этом тепловые процессы в криогенной ВРУ тесно увязываются с основным термодинамическим циклом энергоустановки с использованием процессов рекуперации тепла и холода. Более подробное описание схемы предлагаемой энергоустановки и результаты расчётов её характеристик представлены в статье авторов<sup>13</sup>. Расчёты показывают, что эффективнее всего использовать установку в режиме когенерации – выработки электроэнергии с одновременным отпуском тепла промышленным и коммунальным потребителям (ТЭЦ), что особенно актуально для России и стран с развитой системой централизованного теплоснабжения. Отпуск тепла внешним потребителям обеспечивается теплообменником (22).

### Конкурентные преимущества цикла ОИВТ РАН

Детальный расчётный анализ цикла ОИВТ РАН, результаты которого опубликованы более чем в 20 ведущих рецензируемых научных журналах, определил параметры предлагаемой ТЭЦ и позволил выявить следующие его конкурентные преимущества.

<sup>13</sup> Sinkevich M., Borisov Y., Kosoy A., Ramazanova E., Khalifeb H., Popel O. *Mathematical model and investigation of a 300 MW cogeneration power plant based on the JIHT cycle operating under partial load conditions* // *Fuel*. Vol. 399. 1 November 2025, 135652. DOI:10.1016/j.fuel.2025.1356522025

## Энергетическая эффективность

Предлагаемая ТЭЦ по циклу ОИВТ РАН способна обеспечить производство электроэнергии с КПД на уровне передовых современных энергоустановок (см. сноски 13 и 14). Высокая топливная экономичность цикла достигается путём рекуперации и утилизации компонент отработавшего рабочего тела, а также в результате использования насосов вместо компрессоров для сжатия компонентов. Выполненные в работе<sup>14</sup> детальные сравнительные расчёты энергетической эффективности предлагаемой и традиционных современных ТЭЦ, работающих в климатических условиях средней полосы России по графикам электро- и теплоснабжения крупного населенного пункта показали, что удельный расход условного топлива на производство полезной энергии на ТЭЦ по циклу ОИВТ РАН, с учётом требований тепловых графиков и переменных нагрузок, интегрально за год составляет менее 130 г у.т./кВт·ч. Такая высокая экономичность обеспечивает экономию более 30% топлива по сравнению с современными ТЭЦ даже без учёта потенциальных затрат последних на улавливание парниковых газов из продуктов сгорания. Важную роль в обеспечении высокой топливной эконо-

<sup>14</sup> Косой А.А., Косой А.С., Крысов А.В., Попель О.С., Синкевич М.В., Филиппов С.П. *Цикл ОИВТ РАН. Новый подход к совместному производству тепла и электричества с полным улавливанием диоксида углерода из продуктов сгорания* // *Теплоэнергетика*. 2026 (в печати).

номичности предлагаемой ТЭЦ играет утилизация в разработанном цикле теплоты парообразования топливной воды.

### **Обеспечение теплового графика с высоким коэффициентом использования тепла топлива без пиковых котлов**

ТЭЦ по циклу ОИВТ позволяет регулировать выработку электрической и тепловой мощности в широком соотношении между ними, что позволяет исключить необходимость в составе ТЭЦ пиковых котельных. Так, для энергосистемы АО “Мосэнерго” характерно соотношение установленных тепловой и электрической мощностей  $N_T/N_E$  на уровне 3. Предлагаемая ТЭЦ способна выдавать тепло и электроэнергию в этом соотношении, что для теплофикационных установок в системе АО “Мосэнерго” без пиковых котлов недостижимо. Соотношения мощностей в предлагаемой ТЭЦ регулируется путём варьирования состава парогазовой смеси и давления в камере сгорания с сохранением температуры рабочего тела практически на постоянном уровне. Этим обуславливается высокая маневренность предлагаемой энергоустановки. Изменение давления, как и в закрытых термодинамических циклах, позволяет изменять мощность в широком диапазоне практически при постоянном КПД. При этом использование для теплосетей теплоты конденсации водяного пара, образовавшегося в результате сгорания топлива, дово-

дит коэффициент использования теплоты топлива (КИТТ) до предельно высокого уровня.

Подчеркнём еще раз, что разрабатываемая в США энергоустановка с “oxy-fuel” по циклу Аллама непригодна для ТЭЦ, так как она дефицитна по теплу и реализация эффективной когенерации тепла невозможна.

### **Экологические преимущества**

Климатоэкологические показатели разрабатываемой ТЭЦ крайне привлекательны. Достигается практически полное предотвращение выбросов  $CO_2$  в атмосферу: углекислый газ выводится из цикла в жидкой фазе, самой удобной для транспортировки, хранения и использования.

Предлагаемая ТЭЦ при одинаковой электрической и тепловой годовой нагрузке сжигает по сравнению с традиционными современными ТЭЦ на 30% меньше топлива. Следовательно, объём выделяемого  $CO_2$  и её тепловой выброс в окружающую среду в сравнении с существующими ТЭЦ тоже как минимум на 30% меньше.

Поскольку в цикле ОИВТ РАН для сжигания топлива воздух не используется, а азот присутствует в зоне горения в незначительном количестве, вредные выбросы оксидов азота ничтожны.

Работа предлагаемой высокоманевренной ТЭЦ не требует наличия пиковых котлов и низкоэффективных газотурбинных или дизельных резервных установок с низкими экологическими характеристиками.

В разработке новой ТЭЦ закладываются такие технические решения, как опоры роторных систем лопаточных машин, охлаждаемые и смазываемые с помощью  $\text{CO}_2$  и воды. Подшипники скольжения на воде успешно испытаны в ОИВТ РАН на ПГУ мощностью 60 МВт с массой ротора 800 кг. Отказ от применения масла исключает выбросы его паров и затраты на замену и утилизацию. С экологической точки зрения это бесспорное преимущество. Кроме того, отсутствует выброс с продуктами сгорания водяного пара – также парникового газа.

Предлагаемая концепция ТЭЦ может представлять интерес для использования в качестве топлива “шахтного метана” – мощного парникового газа, выбрасываемого сегодня вентиляционными системами штреков шахт в атмосферу. Это позволит отказаться от использования части “экологически грязных” угольных ТЭЦ и котельных.

### **Обеспечение компенсационной мощности**

Оснащение предлагаемой ТЭЦ дополнительными ёмкостями для аккумулирования криогенных компонентов рабочего тела ( $\text{СПГ}$ ,  $\text{O}_2$ ) с возможностью оптимального распределения энергозатрат на их производство позволяет установке участвовать в регулировании работы электросети при переменных графиках нагрузки.

Цикл ОИВТ РАН относится к полузамкнутым циклам. В установке сохраняется главное преимуще-

ство открытых циклов – отсутствие больших потерь эксергии при подводе тепла от источника к рабочему телу через теплообменную поверхность. При этом она обладает практически всеми преимуществами закрытых циклов. Помимо эффективного регулирования мощностей резко сокращаются термические воздействия на элементы конструкции, что снимает ограничения на скорость перехода между режимами работы. Эти свойства, наряду с возможностью независимого регулирования тепловой и электрической мощности, позволяют выполнять требования к манёвренности для покрытия пиковых электрических нагрузок. Ещё одно преимущество предлагаемой ТЭЦ, как и закрытых циклов, – слабая зависимость от параметров внешней среды.

### **Генерация воды высокого качества**

Цикл ОИВТ обеспечивает полную конденсацию водяного пара из выхлопа, включая “топливную” воду – продукт сгорания водородной составляющей топлива в кислороде. Для ТЭЦ это значительный объём воды. Например, современная ПГУ-325 (325 МВт) или ПГУ-450Т (450 МВт) в номинальном режиме выбрасывают в атмосферу соответственно 2.6 и 3.6 тыс. тонн водяного пара в сутки. Установка по циклу ОИВТ РАН установленной мощностью порядка 300 МВт будет вырабатывать около 1 млн тонн воды в год и может передавать всю эту воду высокого качества (требующую минимальной подготовки,

например, по содержанию  $\text{CO}_2$ ) потребителю для использования в химических технологиях или для подпитки тепловых сетей. Отметим, что стоимость 1 м<sup>3</sup> воды в зависимости от региона России по прогнозам на 2025 год составит от 29 до 66 рублей и более.

### Производство азота

Создание предлагаемой ТЭЦ на кислородном сжигании топлива предполагает использование в составе энергокомплекса высокоэффективной криогенной воздухоразделительной установки, выделяющей из воздуха помимо кислорода, используемого в качестве окислителя топлива, значительных количеств азота, который представляет собой достаточно ценный побочный продукт ТЭЦ, востребованный в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства, и может поставляться его потребителям по соответствующим азотопроводам. В расчете на 1 кг сжигаемого на ТЭЦ метана воздухоразделительной установкой производится более 10 кг азота. Для ТЭЦ мощностью 300 МВт в год будет вырабатываться более 5 млн т азота в год. Азот находит широкое использование в промышленности для создания инертной атмосферы для предотвращения окисления, горения и взрывов, а также как сырье для производства удобрений и химикатов. Ключевыми областями использования азота в нефтегазовой отрасли являются подача азота в скважины, защита трубопроводов, в металлургии – термообработка, сварка, резка, в пищевой промышленности – упа-

ковка товаров для продления их срока годности, в сельском хозяйстве – как инертная среда в зернохранилищах и т.п.

### Вывод углекислого газа из цикла ТЭЦ в жидком виде

Как отмечалось ранее, предлагаемый цикл ОИВТ РАН обеспечивает предотвращение выбросов  $\text{CO}_2$  в атмосферу с продуктами сгорания топлива. Предусматривается его вывод из цикла в жидком виде, удобным для хранения и дальнейшей транспортировки по  $\text{CO}_2$ -проводам для использования в промышленности или для закачки в скважины для интенсификации нефте- и газодобычи и/или для захоронения. Отметим, что в США уже существует разветвленная сеть трубопроводов для транспортировки  $\text{CO}_2$  протяженностью около 8000 км в Техасе, Нью-Мексико, Вайоминге и Луизиане, где  $\text{CO}_2$  используется для закачки в истощенные нефтяные пласты, а также в других промышленных целях. Компания ExxonMobil планирует масштабное расширение сети таких трубопроводов в США до 50–90 тыс. км к 2050 году. Перспективными направлениями использования  $\text{CO}_2$  в промышленности зарубежными и отечественными научными центрами рассматривается производство удобрений (карбамида), пластмасс и других продуктов. Ведутся активные разработки по производству с использованием  $\text{CO}_2$  и водорода различных белковых соединений. Так, компания Solar Foods

(Финляндия)<sup>15</sup> запустила завод по производству протеина из углекислого газа. Этот протеин, получивший название солеин, оказался пригоден для использования как заменитель молочной продукции при изготовлении мороженого, йогуртов, творога, а также продуктов, заменяющих мясо. Солеином можно заменять пищевое яйцо для изготовления хлебобулочных изделий и макарон, сухих завтраков. Аналогичные исследования и разработки ведутся и российскими микробиологами<sup>16</sup> и рассматриваются как перспективные для пищевой промышленности.

### Снижение капитальных затрат

Замена компрессоров насосами для компонентов рабочего тела позволяет достигать перед турбиной давления, характерного для паровых турбин (более 40 МПа), и температуры современных газотурбинных двигателей (свыше 1500 К). Это делает реальным создание энергоустановок единичной мощностью 800, 1200 МВт и более. Высокие удельные мощности обеспечивают низкие массогабаритные показатели турбинного оборудования, что напрямую снижает его стоимость. По сравнению с оснащением традиционной парогазовой ТЭЦ можно говорить о сокраще-

нии затрат на вспомогательное и общестанционное оборудование (маслосистемы, системы выхлопа, водоподготовки и др.).

При этом для практической реализации предлагаемой концепции ТЭЦ требуется проведение комплексных НИОКР по разработке турбинного и генераторного оборудования, включая камеру сгорания, а также теплообменного оборудования, работающего в переменных режимах в сверхкритических условиях и с фазовыми превращениями теплоносителей.

### Широта сфер практического использования

Энергоустановки по циклу ОИВТ РАН потенциально обладают широкой областью применения. Они способны интегрироваться с технологическими процессами в химической промышленности, металлургии, на СПГ-заводах и в горнодобывающей отрасли. На основе предлагаемой ТЭЦ, генерирующей помимо электроэнергии и тепла "побочные" продукты ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ), могут создаваться энерготехнологические комплексы для высокоэффективного производства удобрений, синтез-газа, пластмасс, водорода и других продуктов.

На основе развиваемой концепции кислородного сжигания топлива возможно создание и упрощенных схем энергоустановок, в том числе экологически чистых "котельных", снабжающих потребителей только тепловой энергией. В этом случае схема, представленная на рисунке, упрощается: в камеру сгорания (10) в

<sup>15</sup> Финская компания производит белок из углекислого газа. [https://biostar.ru/industry\\_news/finskaya\\_kompaniya\\_proizvodit\\_belok\\_iz\\_uglekislogo\\_gaza/](https://biostar.ru/industry_news/finskaya_kompaniya_proizvodit_belok_iz_uglekislogo_gaza/)

<sup>16</sup> Дебабов В.Г. Ацетогены: биохимия, энергетика, генетика, биотехнологический потенциал // Микробиология. 2021. Т. 90. № 3. С. 259–285. DOI: 10.31857/S0026365621030022

качестве балластирующего газа подаётся только водяной пар, расширяющийся в турбине до давления 3.2–3.5 МПа. Генерируемая электроэнергия служит для собственных нужд “котельной”. А из схемы может быть исключен компрессор CO<sub>2</sub> (18) и из энергобаланса исключены затраты на его привод.

В связи с высокой маневренностью предлагаемых энергоустановок перспективным представляется их использование в гибридных энергокомплексах в комбинации с солнечными и ветровыми электростанциями, АЭС и перспективными энергоустановками на топливных элементах. Предлагаемые ТЭЦ могут также выступать в роли сетевых накопителей энергии, нарабатывая в часы провала нагрузок криогенные жидкости (СПГ и др.), запасенная в которых энергия “холода” может быть использована для выработки дополнительной энергии в периоды пикового потребления. Это может быть крайне важно в условиях, когда создание гидроаккумулирующих электростанций невозможно по географическим ограничениям (отсутствие требуемых перепадов высот для строительства крупных водохранилищ).

### **Сопряжённые положительные эффекты**

Предлагаемая концепция ТЭЦ на кислородном сжигании топлива позволяет применять в качестве топлива непосредственно сжиженный природный газ (СПГ), производство которого непрерывно увеличивается в газовой отрасли. При этом воз-

можна реализация эффективных схем с участием энергии холода, запасённой в СПГ при сжижении. Сжижение природного газа – энергозатратный процесс (удельные затраты энергии оцениваются в 2.5–3 МДж/кг). Значительная часть этой энергии рассеивается, но часть (до 900 кДж/кг) в виде “холода” сохраняется в СПГ при температуре около –162 °С. Предлагаемая энергоустановка позволяет эффективно и полностью утилизировать эту энергию.

Развитие российской энергетики на основе установок цикла ОИВТ РАН открывает возможности сохранения топливной инфраструктуры страны в максимальном объёме. При этом высвободится значительный объём природного газа для экспорта или иного внутреннего потребления. Может быть ликвидировано неэффективное и экологически вредное производство технического углекислого газа для различных секторов экономики. Стоимость CO<sub>2</sub> будет определяться только затратами на транспортировку и хранение в жидком виде, что существенно расширит сферу его применения (цена 1 т рыночного сжиженного CO<sub>2</sub> в настоящее время варьируется от 40 до 80 тысяч рублей).

Помимо перечисленных преимуществ для ТЭЦ и котельных важно отметить аспект, связанный с развитием электроэнергетики России в будущем, предполагающий в энергосистеме значительное увеличение установленной мощности АЭС, которым требуются компенсирующие мощности. Поскольку АЭС строятся вдали от густонаселённых

городов, последние не смогут участвовать в их теплофикации. Предлагаемые ТЭЦ, обладающие уникальными теплофикационными характеристиками, могут стать базовым оборудованием для городских ТЭЦ и котельных. Они обеспечивают работу по тепловому графику даже при ограничении электрической мощности сетью или при работе на технологическом минимуме электрической нагрузки (режим котельной). При этом будет обеспечено климатически безопасное и эффективное теплоснабжение (с высоким КИТТ и низкими потерями в сетях) с дополнительными преимуществами регулирования и аккумулирования энергии (при постоянной работе АЭС в базовом режиме).

Предлагаемая технология может обеспечить технологическое лидерство России в энергомашиностроении. При разработке предлагаемых энергоустановок максимально могут быть использованы существующие наработки в криогенных и газотурбинных технологиях, что обеспечит технологическую независимость и импортозамещение высокотехнологичного энергооборудования.

### **Полигон-электростанция на базе энергоустановки по циклу ОИВТ РАН**

Для отработки новой технологии в качестве первого этапа предлагается создать полигон-электростанцию с опытной ТЭЦ мощностью 60 МВт. Предварительные проработки показывают, что при этом удастся с минимальными рисками, временными и фи-

нансовыми затратами решить конструктивно-технологические задачи, провести полный цикл НИОКР и опытно-промышленную эксплуатацию пилотного образца. Будут отработаны вопросы отвода CO<sub>2</sub>, количество которого в жидком виде при номинальном режиме для указанной полигон-электростанции превысит 550 тонн в сутки. На основе полученных результатов можно будет перейти к проектированию оборудования для станций мощностью 100, 300, 600 МВт и более. Это позволит определить основные стоимостные показатели будущих ТЭЦ.

В работах по созданию экспериментальной ТЭЦ выразили готовность участвовать многие ведущие предприятия энергомашиностроения, научные и проектные организации России, включая АО "Силовые машины", "Невский завод" и др. Проект получил одобрение Научного совета по направлению приоритетного научно-технологического развития Российской Федерации "Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии", а также Экспертной группы по разработке научно-технического прогноза развития Российской Федерации по направлению "новые энергетические технологии". Проект мог бы стать основой национального проекта технологического лидерства России в области экологически чистой энергетики.