

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ, ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

УГЛЕКИСЛОТНЫЕ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ: НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ НА НАЧАЛЬНЫХ ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ В РОССИИ

© 2022 г. М. А. Верткин^а, *, П. В. Егоров^а, С. Б. Есин^а, С. П. Колпаков^а,
В. Е. Михайлов^а, Ю. Г. Сухоруков^а

^аОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования
им. И.И. Ползунова», Атаманская ул., д. 3/6, Санкт-Петербург, 191167 Россия

*e-mail: VertkinMA@ckti.ru

Поступила в редакцию 30.06.2021 г.

После доработки 29.07.2021 г.

Принята к публикации 25.08.2021 г.

Углекислотные энергоустановки (CO₂-ЭУ) — это тепловые энергоустановки, в которых в качестве рабочего тела используется углекислый газ (CO₂). Их КПД при довольно высокой начальной температуре перед турбиной может превышать КПД паротурбинных аналогов. Во всех развитых странах проводятся интенсивные исследования по созданию CO₂-ЭУ разного назначения, как правило, при активном участии государственного сектора, включая разработку государственных программ, адресное бюджетное финансирование, планирование и контроль за ходом выполнения работ. Основное внимание уделяется решению проблемы снижения металлоемкости и стоимости теплообменного оборудования. На примере анализа целесообразности реконструкции отечественной ядерной энергетической установки (ЯЭУ) мощностью 1200 МВт с реакторной установкой (РУ) на быстрых нейтронах и натриевым теплоносителем путем замены паросиловой установки на CO₂-ЭУ показано, что для энергоустановок большой мощности при умеренных начальных температурах указанная реконструкция приводит к снижению их экономичности вследствие многократного увеличения металлоемкости, габаритов и стоимости теплообменного оборудования. Повышение экономичности в сравнении с паротурбинными аналогами возможно путем повышения начальной температуры и понижения единичной мощности. На начальных этапах проектирования целесообразно сосредоточить усилия на создании оборудования силовой части малой мощности одного типоразмера (с унифицированным основным компрессором), предназначенного для использования в CO₂-ЭУ на объектах солнечной, атомной и тепловой энергетики. Обязательной стадией создания CO₂-ЭУ разных мощностей и назначения является разработка опытно-демонстрационной (ОД) CO₂-ЭУ малой мощности, предназначенной для проведения испытаний и экспериментальной отработки оборудования и технологии его эксплуатации. Для обеспечения снижения стоимости рекуператоров ОД CO₂-ЭУ необходимо создать стенд для испытаний теплообменных модулей (ТОМ), из которых будут собраны рекуператоры ОД CO₂-ЭУ. Разработана принципиальная тепловая схема стендовой установки, обеспечивающей точное воспроизведение условий эксплуатации ТОМ в составе рекуператоров ОД CO₂-ЭУ. Представлено описание задач, которые должны быть решены по результатам экспериментальных исследований, приведены примеры схем микроканальных теплообменников, позволяющих снизить габариты ТОМ. Разработана рабочая конструкторская документация на ТОМ должна быть увязана с разработкой технологической документации и планами по совершенствованию технологической подготовки производства на предприятии — индустриальном партнере, который возьмет на себя изготовление теплообменного оборудования ОД CO₂-ЭУ.

Ключевые слова: сверхкритический углекислотный цикл Брайтона, углекислотная энергоустановка, опытно-демонстрационная энергоустановка, рекомпрессинг, рекуператор, теплообменник, теплообменный модуль, стенд для испытаний теплообменных модулей, микроканальные теплообменники

DOI: 10.1134/S0040363622040087

Многолетний мировой опыт поиска оптимальных технических и схемных решений для углекислотных энергоустановок, включая исследования советских и российских ученых, увенчался созданием CO₂-ЭУ с рекомпрессингом. Простей-

ший вариант ее принципиальной схемы показан на рис. 1.

В сравнении с паротурбинными установками данная CO₂-ЭУ имеет следующие преимущества: значительно более компактное турбинное обо-

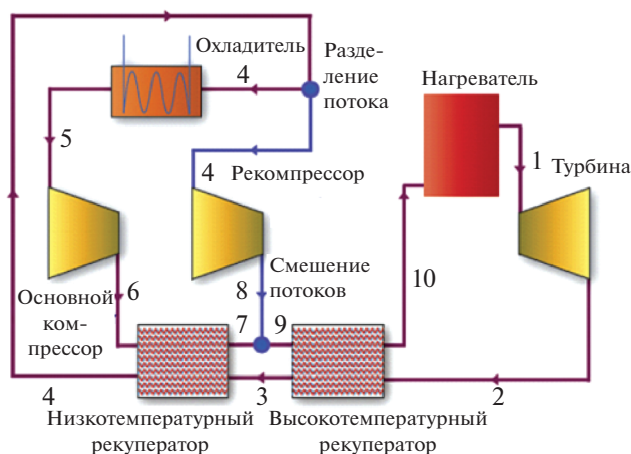


Рис. 1. Принципиальная схема CO_2 -ЭУ с рекомпрессингом (простейший вариант) [1, 2]

дование, чем цилиндры низкого и среднего давления паровых турбин, отсутствие риска замерзания рабочего тела при низких температурах. Но главное ее достоинство состоит в том, что благодаря свойствам углекислого газа (CO_2) в закритической области ($s\text{CO}_2$), особенно вблизи критической точки 7,384 МПа (резкое увеличение плотности и теплоемкости при снижении температуры), КПД углекислотного регенеративного цикла Брайтона ($s\text{CO}_2$ -цикла) при довольно высокой начальной температуре перед турбиной оказывается выше КПД обычного (пароводяного) регенеративного цикла Ренкина.

Теоретически максимальный (потенциальный) уровень КПД цикла при заданных исходных ограничениях характеризуется термическим КПД цикла, определяемым при нулевых потерях давления во всех элементах схемы: и при изэнтропийном сжатии в компрессорах, и при изэнтропийном расширении рабочего тела в турбинах. В табл. 1 приведены результаты расчета термического КПД $s\text{CO}_2$ -цикла Брайтона с рекомпрессингом в трех вариантах: простейшем (см. рис. 1), с промежуточным охлаждением $s\text{CO}_2$ при сжатии в основном компрессоре (ОК) и с промежуточным перегревом $s\text{CO}_2$ при расширении в турбине при следующих исходных данных и ограничениях:

потери давления в элементах схемы отсутствуют;

расширение и сжатие — изэнтропийное;

температура CO_2 за охладителями 32°C , начальная температура 700°C ;

начальное давление 24,0 МПа;

давление CO_2 в охладителях (перед компрессорами) и в промежуточном перегревателе оптимизируются по термическому КПД цикла;

минимально допустимый температурный напор на концах рекуператоров 10°C .

Термический КПД (η_t) определен с оптимизацией давлений перед ОК, в промежуточном охладителе ОК и промежуточном перегревателе. Коэффициент полезного действия $s\text{CO}_2$ -цикла (η) рассчитывают с учетом потерь давления в схеме CO_2 -ЭУ. При довольно высоком и реально достижимом относительном КПД цикла, равном η/η_t , КПД $s\text{CO}_2$ -цикла будет превышать КПД пароводяного цикла Ренкина при одинаковых мощностях первичных источников тепла и начальных давлениях и высоких начальных температурах. При этом разница в КПД циклов будет возрастать не только с повышением начальной температуры, но и при снижении единичной мощности. Последнее связано с тем, что КПД CO_2 -ЭУ, как и КПД любой другой газотурбинной установки (ГТУ), менее чувствителен к изменению единичной мощности (в диапазоне малых и средних мощностей), чем КПД паротурбинного блока.

Первичным источником тепла могут быть как реактор ЯЭУ, так и солнечные концентраторы гелиотермальной электростанции или котел, работающий на органическом топливе. При этом обеспечивается снижение выбросов CO_2 вследствие снижения расхода топлива в котлотурбинных энергоблоках, использования установок улавливания CO_2 из дымовых газов котлотурбинных CO_2 -ЭУ и увеличения выработки электроэнергии на гелиотермальных электростанциях и ЯЭУ малой мощности благодаря повышению их КПД с соответствующим снижением выработки электроэнергии на ископаемом топливе.

СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТОК CO_2 -ЭУ ЗА РУБЕЖОМ. ОПЫТНО-ДЕМОНСТРАЦИОННЫЕ CO_2 -ЭУ

Преимущества $s\text{CO}_2$ -цикла обусловили повышенный интерес в развитых странах к исследованиям в области создания высокоэффективных CO_2 -ЭУ разной мощности и назначения. Данное направление активно разрабатывается, как правило, при участии государственного сектора и включает в себя составление государственных программ, адресное бюджетное финансирование, выполнение части НИОКР силами национальных лабораторий и НИИ, планирование и контроль выполнения работ.

Известно, например, что в разработке национальных программ исследований по созданию CO_2 -ЭУ в США задействованы все три офиса (департамента) Национальной лаборатории энергетических технологий NETL при Минэнерго США — по возобновляемой, тепловой и атомной энергетике. В реализации программ принимают

Таблица 1. Результаты расчета термического КПД CO_2 -цикла Брайтона с рекомпрессингом в трех вариантах

Номер точки схемы (рис. 1), наименование точки цикла	p , МПа	t , °С	h , кДж/кг	s , Дж/(кг · К)	Относительный расход
<i>Простейшая схема</i>					
1	24.00	700.0	1221.900	2913.400	1.0
2	7.57	531.8	1023.220	2913.400	1.0
3	7.57	201.1	642.500	2306.200	1.0
4	7.57	84.1	501.634	1963.470	1.0
5	7.57	32.0	322.382	1399.970	0.628113287
6	24.00	74.1	348.360	1399.970	0.628113287
7	24.00	191.1	572.630	1963.466	0.628113287
8	24.00	191.1	572.630	1963.466	0.371886713
9	24.00	191.1	572.630	1963.466	1.0
10	24.00	486.6	572.630	2602.030	1.0
Термический КПД	0.58075				
<i>С промежуточным охладителем</i>					
1	24.00	700.0	1221.900	2913.400	1.0
2	7.57	495.9	982.440	2913.400	1.0
3	5.77	226.0	676.250	2424.400	1.0
4	5.77	81.3	513.756	2038.800	1.0
5	5.77	32.0	440.584	1815.176	0.609750217
За промежуточным охладителем ОК	7.59	32.0	316.841	1381.690	0.609750217
6	24.00	71.3	342.030	1381.690	0.609750217
7	24.00	216.0	608.530	2038.801	0.609750217
8	24.00	216.0	608.530	2038.801	0.390249783
9	24.00	216.0	608.530	2038.801	1.0
10	24.00	455.6	608.530	2550.130	1.0
Термический КПД	0.58799				
<i>С промежуточным охладителем и промежуточным перегревом</i>					
1	24.00	700.00	1221.900	2913.400	1.0
За промежуточным перегревателем	11.00	700.00	1226.990	3071.380	1.0
2	7.91	582.00	1085.880	2913.400	1.0
3	4.91	242.90	697.350	2495.270	1.0
4	4.91	81.80	521.407	2085.890	1.0
5	4.91	32.00	456.254	1887.372	0.609392831
За промежуточным охладителем ОК	7.585	32.00	317.895	1385.174	0.609392831
6	24.00	71.80	343.240	1385.174	0.609392831
7	24.00	232.90	631.960	2085.894	0.609392831
8	24.00	232.94	631.960	2085.894	0.390607169
9	24.00	232.90	631.960	2085.894	1.0
10	24.00	540.50	631.960	2687.410	1.0
Термический КПД	0.60788				

участие крупнейшие национальные лаборатории и НИИ: Аргоннская национальная лаборатория (ANL), Нользская лаборатория ядерной энергетики (KAPL – Knolls Atomic Power Laboratory), Национальная лаборатория возобновляемой энергии (NREL), Сандийские национальные лаборатории (SNL), Массачусетский технологический институт (MIT), Юго-Западный исследовательский институт (SwRI), НИИ газовых технологий (GTI) и др. Все национальные НИИ и лаборатории оснащены крупными интегрально-испытательными комплексами (Integrated systems test – IST) с высокой вариативностью схем и конфигураций лабораторных установок и технологическим оборудованием.

Тем не менее, дистанция, которую предстоит пройти по пути создания и доработки CO_2 -ЭУ до уровня, пригодного для промышленного использования на объектах энергетики, все еще весьма велика. Не случайно в последние годы исследования вышли на новый этап – строительство опытно-демонстрационных CO_2 -ЭУ более высокой мощности, чем лабораторные установки. Можно отметить ОД CO_2 -ЭУ мощностью 10 МВт, ввод в опытную эксплуатацию которой запланирован на начало 2022 г. в г. Сан-Антонио, США. Ее проект разработан в рамках реализации национальных программ SunShot и Supercritical Transformation Electric Power (STEP).

Создание ОД CO_2 -ЭУ с газовым котлом является необходимым условием и неотъемлемой частью разработки и постановки на производство оборудования силовой части (СЧ) CO_2 -ЭУ разной мощности и для разных областей применения. Мощность ОД CO_2 -ЭУ экономически целесообразно определить на минимальном уровне, при котором сохранялся бы высокий рыночный потенциал оборудования силовой части ОД CO_2 -ЭУ применительно к промышленному использованию на объектах не только тепловой, но также солнечной и атомной энергетики. Назначение ОД CO_2 -ЭУ – экспериментальные исследования в целях отработки оборудования СЧ CO_2 -ЭУ, технологии его эксплуатации, решение других частных поисковых и исследовательских задач, испытания изготавливаемого оборудования СЧ (демонстрационные, режимные, сертификационные, гарантийные испытания на соответствие показателей оборудования проектным значениям).

О ПЕРСПЕКТИВАХ ПРИМЕНЕНИЯ CO_2 -ЭУ В ЯЭУ С УЧЕТОМ ПОВЫШЕНИЯ МЕТАЛЛОЕМКОСТИ И СТОИМОСТИ ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Научных и технических проблем, которые предстоит решить в процессе создания ОД CO_2 -ЭУ, много. Главная из них – снижение металлоемко-

сти и стоимости теплообменного оборудования. Пояснение этого обстоятельства возможно на примере анализа целесообразности реконструкции отечественной ЯЭУ с РУ на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем БН-1200 путем замены ее паросиловой установки на CO_2 -ЭУ. В базовом проекте подвод тепла к рабочему телу (водяному пару) происходит в парогенераторе, в модернизированном проекте – через теплообменник (ТО) $\text{Na}_\text{ж}/\text{sCO}_2$ при таких же начальной температуре рабочего тела перед турбиной (510°C) и температуре жидкого натрия ($\text{Na}_\text{ж}$) на входе/выходе подогревателя рабочего тела ($527/355^\circ\text{C}$), что и в базовом проекте [3]. Идея такой реконструкции ЯЭУ была вызвана большим количеством зарубежных публикаций, посвященных применению CO_2 -ЭУ в ЯЭУ с натриевыми реакторными установками большой мощности.

Известно, что КПД закрытого регенеративно-го цикла Брайтона зависит от относительных потерь давления в цикле и температурных напоров в низконапорных точках теплообменного оборудования. Чем меньше эти параметры, тем выше КПД цикла. В табл. 2 приведены значения этих параметров в наиболее популярных концептуальных проектах CO_2 -ЭУ для ЯЭУ с РУ тепловой мощностью от 250 до 1522 МВт, разрабатывавшихся в разных странах: Astrid (Франция) [4], Kalimer-600 (Корея) [5], AFR-100 (США) [6].

Из приведенных в табл. 2 данных следует, что получение довольно высоких значений КПД цикла в указанных проектах достигается при нереально низких потерях давления и температурных напорах, приводящих к чрезмерному возрастанию площади теплообменных поверхностей и металлоемкости ТО $\text{Na}_\text{ж}/\text{sCO}_2$ и рекуператоров.

В расчетах для РУ БН-1200 в целях снижения металлоемкости рекуператоров и ТО $\text{Na}_\text{ж}/\text{sCO}_2$ при заданных температурах $\text{Na}_\text{ж}$ на входе/выходе ТО $\text{Na}_\text{ж}/\text{sCO}_2$ ($527/355^\circ\text{C}$) на уровне значений базового проекта было применено двухкаскадное исполнение ОК с промежуточным охладителем CO_2 . Относительные потери давления CO_2 были заданы более высокими, чем в указанных проектах. В частности, относительные потери давления sCO_2 только в ТО $\text{Na}_\text{ж}/\text{sCO}_2$ (без учета потерь в рекуператорах и трубопроводах sCO_2) были заданы равными 1.3%. Суммарные относительные потери давления в тракте ВД составили 2.91%, в тракте НД – 3.33%. Коэффициенты полезного действия компрессоров и турбин были приняты такими же, как в упомянутых зарубежных проектах – в соответствии с данными Американского общества инженеров-механиков (ASME). Минимально допустимое значение температурного напора в температурных точках (на холодных концах рекуператоров) задано равным 10°C .

Таблица 2. Характеристические температурные напоры в рекуператорах Δt в некоторых проектах CO_2 -ЭУ для ЯЭУ

Проект, участок схемы	$\Delta t_{\text{г.к.}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\text{х.к.}}, ^\circ\text{C}$	Эффективность, % (степень рекуперации)
Astrid $N_p = 1500 \text{ МВт}$			
ТО $\text{Na}_\text{ж}/\text{CO}_2$	15.0	39.5	92.1
ВТР	—	15.0	—
НТР	—	10.0	—
Kalimer-600 $N_p = 1522 \text{ МВт}$			
ТО $\text{Na}_\text{ж}/\text{CO}_2$	18.0	10.1	94.1
ВТР	40.3	17.3	91.7
НТР	18.9	6.4	94.6
AFR-100 с воздушным охлаждением $N_p = 250 \text{ МВт}$			
ТО $\text{Na}_\text{ж}/\text{CO}_2$	4.2	17.4	96.3
ВТР	40.8	9.3	95.5
НТР	13.7	9.3	94.6

Относительные потери давления, %, в тракте CO_2 высокого давления составляют 0.32 (Astrid), 1.30 (Kalimer-600), 0.88 (AFR-100 с воздушным охлаждением), в тракте CO_2 низкого давления 2.63 (Kalimer-600), 1.29 (AFR-100 с воздушным охлаждением).

Примечание. N_p — тепловая мощность реактора; ВТР, НТР — высокотемпературный и низкотемпературный рекуператор; г.к, х.к — горячий и холодный конец.

По результатам оптимизации параметров $s\text{CO}_2$ -цикла при давлении и температуре $s\text{CO}_2$ перед турбиной 24.0 МПа и 510°C , температуре CO_2 НД перед ОК и за промежуточным охладителем ОК 32°C КПД цикла составил 43.1%. Это выше, чем в указанных аналогах. Полезная мощность на валу составила 1204.45 МВт. Применение двух-каскадного ОК с промежуточным охладителем позволило снизить оптимальное давление перед ОК до 7.047 МПа (ниже критического), повысить степень расширения $s\text{CO}_2$ в турбине и снизить температуру $s\text{CO}_2$ на входе в ТО $\text{Na}_\text{ж}/s\text{CO}_2$ до 334.73°C , тем самым увеличить температурный напор на холодном конце ТО $\text{Na}_\text{ж}/s\text{CO}_2$ до 20.17°C , а также уменьшить тепловую мощность рекуператоров.

На рис. 2 приведена t, Q -диаграмма процесса теплообмена в одном из четырех парогенераторов РУ БН-1200 и в одном из четырех ТО $\text{Na}_\text{ж}/s\text{CO}_2$. Тепловая мощность каждого парогенератора или ТО $\text{Na}_\text{ж}/s\text{CO}_2$ составляет 700 МВт, температура греющего теплоносителя $\text{Na}_\text{ж}$ (1) в парогенераторе или ТО снижается от 527 до 355°C , температура $s\text{CO}_2$ возрастает в ТО $\text{Na}_\text{ж}/s\text{CO}_2$ с 334.73 до 510°C , температура воды (пара) в парогенераторе повы-

шается от 275 до 510°C [3] (3). Средний температурный напор в ТО $\text{Na}_\text{ж}/s\text{CO}_2$ оказался более чем втрое меньше, чем в парогенераторе базового проекта. При этом тепловая мощность рекуператоров составила 4358.4 МВт, что в 4.5–5.0 раз выше тепловой мощности регенеративных подогревателей паротурбинной установки базового проекта. Коэффициенты же теплопередачи в ТО $\text{Na}_\text{ж}/s\text{CO}_2$ и рекуператорах ниже, чем в парогенераторе и регенеративных подогревателях высокого (ПВД) и низкого

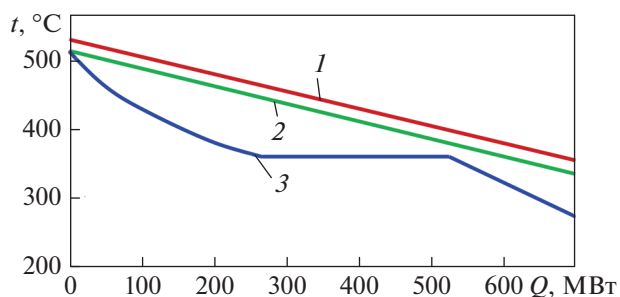


Рис. 2. t, Q -диаграмма процесса теплообмена в парогенераторе и ТО $\text{Na}_\text{ж}/s\text{CO}_2$. 1 — Na ; 2 — CO_2 ; 3 — H_2O ; Q — тепловая мощность рекуператора; t — температура теплоносителя

(ПНД) давлений (прежде всего, в силу принятых ограничений по скоростям потоков в целях снижения потерь давления в трактах по $s\text{CO}_2$ и CO_2 НД). Так, коэффициенты теплопередачи в рекуператорах изменяются в диапазоне 490–730 Вт/(К · м²) в зависимости от температуры, в ПВД и ПНД – в диапазоне 3200–4400 Вт/(К · м²), т.е. они более чем в 5 раз выше. Кроме того, при одинаковой тепловой мощности первичного источника тепла суммарная тепловая мощность рекуператоров CO_2 -ЭУ превосходит мощность регенераторов (ПНД и ПВД) паротурбинной установки примерно в 4.7 раза. При этом объемные расходы греющего теплоносителя в рекуператорах более чем на порядок выше, чем в ПВД и ПНД. В итоге, металлоемкость и стоимость теплообменного оборудования, особенно рекуператоров, с переходом на CO_2 -цикл многократно увеличиваются. Это основная или, по крайней мере, одна из основных причин снижения экономичности энергоблока ЯЭУ с РУ БН-1200 при переходе на $s\text{CO}_2$.

К числу других факторов, повышающих уровень капитальных и эксплуатационных затрат с переходом на CO_2 -цикл, относятся следующие:

недостаточно высокая начальная температура $s\text{CO}_2$ и большая мощность, при которой КПД паротурбинного регенеративного цикла Ренкина с промежуточным перегревом теоретически оказывается выше КПД регенеративного $s\text{CO}_2$ -цикла Брайтона с рекомпрессором (особенно если учесть внутрикорпусные протечки CO_2);

трудности в реализации процесса нормированного первичного регулирования частоты и участия в автоматизированном вторичном регулировании частоты в сочетании с поддержанием температуры натрия за ТО $\text{Na}_\text{ж}/s\text{CO}_2$ на заданном уровне при неизменной тепловой мощности РУ (в паросиловой части таких проблем нет);

сложность исполнения регулирующих клапанов, турбокомпрессорного оборудования, электрогенератора и корпусных конструкций для их размещения, исключающего утечки CO_2 из контура CO_2 -ЭУ в машинный зал и попадание машинного масла и/или других рабочих жидкостей в контур CO_2 -ЭУ;

дополнительные затраты, связанные со строительством и эксплуатацией углекислотного цеха, включая расходы на восполнение оперативных запасов циклового CO_2 вследствие потерь CO_2 при остановках и пусках, а также при возникновении аварийных утечек CO_2 из контура CO_2 -ЭУ в машинный зал или в контур жидкого натрия.

Переход к двухконтурной схеме РУ с натриевым теплоносителем при использовании CO_2 , который предполагалось осуществить в двух из вышеуказанных проектов (кроме Astrid) в целях по-

вышения начальной температуры $s\text{CO}_2$, также проблематичен, так как в случае возникновения течи $s\text{CO}_2$ в контур $\text{Na}_\text{ж}$ будут образовываться твердые осадки (частицы) с высокой температурой плавления – Na_2O , Na_2CO_3 и С (углерод в виде сажи), которые будут засорять тракт охлаждения $\text{Na}_\text{ж}$ реакторной установки.

Снижение экономичности ЯЭУ с РУ БН-1200 с переходом на $s\text{CO}_2$ не исключает возможности эффективного применения CO_2 -ЭУ в ЯЭУ меньшей мощности и с другими теплоносителями, например с жидким свинцом ($\text{Pb}_\text{ж}$). Свинец устойчив к наведенной радиоактивности и химически нейтрален по отношению к CO_2 , что обеспечивает возможность применения двухконтурной РУ. Расход и температура $\text{Pb}_\text{ж}$ на выходе ТО $\text{Pb}_\text{ж}/s\text{CO}_2$ (примерно 420°C) выше, чем у ТО $\text{Na}_\text{ж}/s\text{CO}_2$, что позволяет увеличить средний температурный напор в ТО при более высокой начальной температуре, чем в ЯЭУ с натриевыми РУ. Со снижением мощности преимущество CO_2 -ЭУ в КПД по сравнению с паросиловыми энергетическими установками, как было указано ранее, возрастает. Температура рабочего тела на входе в ТО $\text{Pb}_\text{ж}/s\text{CO}_2$ выше, чем температура плавления свинца, что также упрощает схему энергоустановки и технологию ее эксплуатации по сравнению с паросиловым вариантом.

В технологической дорожной карте для систем ЯЭУ IV поколения (A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems), разработанной Консультативным комитетом по исследованиям в области ядерной энергии Министерства энергетики США и Международным форумом ЯЭУ IV поколения (U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and Generation IV International Forum), $s\text{CO}_2$ фигурирует в качестве основного рабочего тела только применительно к проектам ЯЭУ IV поколения с быстрыми реакторами со свинцовым (свинцово-висмутовым) теплоносителем (Lead-cooled Fast Reactor—LFR) [7]. Таковым на сегодня является проект ЯЭУ со свинцовым теплоносителем SSTAR 20 (Small Secure Transportable Autonomous Reactor, США) мощностью 20 МВт [8], где $s\text{CO}_2$ -цикл оказывается более предпочтительным по отношению к H_2O -циклу Ренкина в силу указанных выше преимуществ, компенсирующих увеличение стоимости теплообменного оборудования.

Приведенные соображения относительно важности решения проблемы снижения металлоемкости и стоимости теплообменного оборудования CO_2 -ЭУ, изложенные на примере CO_2 -ЭУ для ЯЭУ с быстрыми реакторами, в полной мере относятся и к углекислотным энергоустановкам, предназначенным для применения на объектах тепловой и солнечной энергетики.

О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ СОЗДАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ СИЛОВОЙ ЧАСТИ CO_2 -ЭУ С РЕКОМПРЕССИНГОМ МОЩНОСТЬЮ 16 МВт ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА ОБЪЕКТАХ АТОМНОЙ, СОЛНЕЧНОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Прогнозируемое распределение объемов реализации создаваемых CO_2 -ЭУ по возможным областям применения согласно данным [9] следующее, %:

Солнечная энергия	36.49
Ядерный реактор	27.3
Ископаемое топливо	14.66
Утилизация сбросного тепла	9.48
Топливные элементы	8.33
Геотермальная энергия	3.74

По данным [9] и других зарубежных публикаций наиболее перспективной областью внедрения CO_2 -ЭУ малой и средней мощности за рубежом являются солнечные тепловые (гелиотермальные) энергетические установки (СТЭУ) с солнечными концентраторами (гелиостатами) — новое направление развития солнечной энергетики. От классических фотоэлектрических панелей СТЭУ отличаются тем, что прямая составляющая солнечного излучения, отраженного концентраторами в приемник световой энергии (ресивер), используется для нагрева рабочего тела, которое потом совершает работу в теплосиловой части СТЭУ.

В качестве рабочего тела в СТЭУ в настоящее время используют водяной пар. При довольно больших мощностях, позволяющих применить высокие начальные параметры пара и промежуточный перегрев. КПД мощных СТЭУ, размещенных в районах с высокой долей прямого солнечного излучения в суммарном потоке, приходящем на землю, может существенно превышать КПД современных солнечных электростанций с фотоэлектрическими преобразователями (ФЭС).

Другие преимущества СТЭУ перед ФЭС — более высокий ресурс оборудования, отсутствие проблем с его утилизацией после выработки ресурса и более широкие возможности аккумулирования солнечной энергии. Последнее обеспечено тем, что в СТЭУ, предназначенных для отпуска электроэнергии в электросеть, применяют промежуточные теплоносители — солевые расплавы и другие жидкие теплоносители с высокотемпературным фазовым переходом, которые после нагрева их в ресивере отдают свое тепло рабочему телу. Известно, что в СТЭУ башенного типа промежуточный теплоноситель может быть нагрет до весьма высоких температур (теоретически выше 1000°C). Применение промежуточного теплоносителя с высокотемпературным фазовым переходом

при относительно малом его расходе позволяет передавать большое количество тепла и, соответственно, уменьшить его массу в контуре СТЭУ.

В комплект СТЭУ входят накопительные емкости (танки) для хранения жидкого высоко- и низкотемпературного теплоносителя. Это позволяет аккумулировать тепловую энергию в высокотемпературном танке и выдавать электроэнергию длительное время после захода солнца. Так, СТЭУ башенного типа DEWA CSP Tower (высота башни 260 м) с солевым расплавом и паровой турбиной мощностью 100 МВт, намеченная к вводу в эксплуатацию в ноябре 2021 г. (на момент написания статьи) в составе комбинированного комплекса солнечной генерации Mohammed bin Rashid Al Maktoum (г. Дубай, ОАЭ), способна работать на номинальной мощности при нормальных условиях без подвода тепла через ресивер в течение 15 ч. Нормированная стоимость отпущаемой электроэнергии определена на уровне 0.073 дол/(кВт · ч) [10].

Следует отметить, что высокая мощность достигается при большой площади размещения солнечных концентраторов, что экономически оправдано только в малонаселенных засушливых пустынных районах солнечного пояса, малопригодных для интенсивного земледелия. Использование CO_2 -ЭУ в СТЭУ позволяет существенно расширить область их применения. При получении высокой начальной температуры рабочего тела (700°C и выше) обеспечивается возможность повышения КПД СТЭУ башенного типа с CO_2 -ЭУ малой и средней мощности до уровня СТЭУ с паросиловой частью большой мощности. Умеренные размеры площади размещения гелиостатов и высота башни с ресивером делают СТЭУ малой и средней мощности конкурентоспособными в сравнении с ФЭС применительно к распределенной энергетике. Не случайно основные финансовые вложения США в развитие CO_2 -ЭУ осваиваются именно в рамках вышеупомянутой программы SunShot (программы исследований и создания CO_2 -ЭУ для СТЭУ). Не менее интенсивные разработки CO_2 -ЭУ для СТЭУ ведутся и в других развитых странах (КНР, Япония, страны ЕС и др.).

Следует отметить, что вопрос о перспективах применения СТЭУ в России сегодня является дискуссионным. Превалирует мнение, что на территории России перспективных районов для строительства СТЭУ очень немного. Это объясняют тем, что диффузная составляющая солнечного излучения, которая не может быть сконцентрирована и направлена на ресивер, почти на всей территории России составляет не менее 40—50%, а в районах с влажным климатом достигает 60% и более. Исходя из изложенного, при определении мощности создаваемого оборудования силовой части CO_2 -ЭУ следует ориентироваться,

главным образом, на зарубежного потенциально-го потребителя, планирующего использовать это оборудование в СТЭУ малой и средней мощности, т.е. в диапазоне 10–20 МВт.

Что же касается котлотурбинных CO_2 -ЭУ, то в зарубежных публикациях их применение рассматривается, в основном, для угольных электростанций большой мощности [11–13]. Принципиальная схема таких CO_2 -ЭУ отличается от исходной, показанной на рис. 1, наличием промежуточного перегрева и промежуточного охлаждения CO_2 в ОК либо конденсатора CO_2 НД перед ОК [13] (если внешние условия позволяют переохладить отработанный CO_2 НД до температуры 21°C).

Вследствие высокой температуры рабочего тела на входе в котел охлаждение дымовых газов до приемлемой (относительно КПД котла) температуры только за счет нагрева циклового воздуха в регенеративном воздухоподогревателе невозможно без включения в состав оборудования тепловой электростанции (ТЭС) дополнительного потребителя тепла уходящих газов. Таковым в [11] является десорбер системы улавливания CO_2 из дымовых газов абсорбционного типа с использованием моноэтаноламина ($\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$) в качестве абсорбента. Полученный CO_2 с минимальными дополнительными затратами может быть очищен и доведен до уровня товарной углекислоты, т.е. реализуется комбинированная выработка электроэнергии и товарной углекислоты. Другое решение состоит в применении в качестве потребителей тепла в хвостовой части котла байпасных подогревателей $s\text{CO}_2$, включенных в схему подогрева $s\text{CO}_2$ параллельно одному или обоим рекуператорам [14, 15].

В России, если принять во внимание планируемый перевод всех крупных ТЭС на газовое топливо, более востребованными будут твердотопливные котлотурбинные энергоустановки малой и средней мощности (6–20 МВт), работающие на местном низкокалорийном топливе, в частности на отходах лесозаготовительных, сельскохозяйственных и других предприятий, иловых осадках, а также нетоксичных твердых бытовых органических отходов. В этом качестве твердотопливные котлотурбинные CO_2 -ЭУ в связи с целым рядом их особенностей (высокая температура среды сжигания топлива, высокий КПД цикла, возможность комбинированной выработки электроэнергии и товарной углекислоты, дешевое рабочее тело) оказываются более эффективными, чем энергоустановки с другими, в том числе и низкокипящими, рабочими телами.

Практический интерес представляют также исследования по созданию теплоутилизационных CO_2 -ЭУ. Они могут быть применены для выработки энергии на тепле высокотемпературных отходящих газов различных технологических про-

цессов и установок, в частности выхлопных газов газотурбинных двигателей (ГТД) в установках комбинированного цикла (УКЦ). Утилизационная CO_2 -ЭУ, как правило, не имеет рекомпрессора, но содержит высоко- и низкотемпературную турбины [16]. Мощность и параметры оборудования утилизационной CO_2 -ЭУ для УКЦ определяются в зависимости от параметров выхлопных газов ГТД. Преимущество утилизационной CO_2 -ЭУ в КПД утилизационного контура по сравнению с паросиловой частью парогазовой установки проявляется в большей степени применительно к ГТУ малой мощности (16–25 МВт). Несмотря на более высокую металлоемкость и стоимость теплообменного оборудования, утилизационные CO_2 -ЭУ могут оказаться предпочтительнее паротурбинных аналогов для применения в условиях холодного климата благодаря не только более высокой тепловой эффективности, но и отсутствию риска замерзания рабочего тела в случае аварийного останова и эксплуатационных затрат на водоподготовку и очистку парогенератора от накипи.

Определение мощности CO_2 -ЭУ с рекомпрессором и утилизационной CO_2 -ЭУ целесообразно выполнить таким образом, чтобы низкотемпературный компрессор CO_2 -ЭУ обоих типов был полностью унифицирован. По результатам предварительной оптимизации утилизационного контура УКЦ на базе ГТД с параметрами выхлопных газов (расход, состав, температура) такими же, как у ГТЭ-16ПА производства АО “ОДК-Авиадвигатель”, были определены параметры ОК утилизационной CO_2 -ЭУ. Установлено, что мощность CO_2 -ЭУ с рекомпрессором и таким же ОК составит примерно 16 МВт, что вписывается в диапазоны мощностей CO_2 -ЭУ с рекомпрессором для всех трех приведенных выше областей применения CO_2 -ЭУ этого типа.

Таким образом, на основании изложенного можно сделать вывод о том, что по мере решения проблемы снижения стоимости теплообменного оборудования целесообразно создать оборудование силовой части одного типоразмера (с унифицированным ОК), пригодное для использования в CO_2 -ЭУ малой мощности на объектах солнечной, атомной и тепловой энергетики.

СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ТЕПЛООБМЕННЫХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ РЕКУПЕРАТОРОВ ОПЫТНО-ДЕМОНСТРАЦИОННОЙ CO_2 -ЭУ

Исходя из новизны создаваемой ОД CO_2 -ЭУ, для разработки проектной и конструкторской документации следует подготовить и провести экспериментальные исследования в объеме, необходимом для решения первоочередных проблемных

задач, возникающих на начальных этапах проектирования. В первую очередь, речь идет о создании стенда для испытаний и отработки технологии изготовления теплообменных модулей (ТОМ), из которых будут набраны поверхности теплообмена рекуператоров ОД CO_2 -ЭУ путем их параллельного включения в конструкцию рекуператоров по трактам $s\text{CO}_2$ и CO_2 НД. Такое решение позволяет проводить испытания не всего рекуператора, а только его части с соответствующим сокращением расходов $s\text{CO}_2$ и CO_2 НД (в 17–20 раз), а следовательно, и снижением металлоемкости и стоимости изготовления опытных образцов, мощности нагнетателей, тепловой мощности первичных источников тепла, обеспечивая, таким образом, решение первоочередных задач с минимальными стоимостными и временными затратами.

Разработана принципиальная тепловая схема стендовой установки для испытаний ТОМ низко- и высокотемпературного рекуператоров, выполненной с возможностью варьирования расходов $s\text{CO}_2$ и CO_2 НД через ТОМ в достаточно широком диапазоне, позволяющая довольно точно смоделировать условия работы рекуператоров в схеме ОД CO_2 -ЭУ и по результатам проведения испытаний ТОМ решить следующие задачи:

верификацию расчетных методик и программных кодов, используемых для выполнения комплекса теплогидравлических и прочностных расчетов при проектировании ТОМ;

выбор материалов для изготовления ТОМ;

выбор конфигурации поверхностей нагрева, а также типа ТОМ в консервативном и инновационном вариантах исполнения с использованием компактных микроканальных ТО (МКТО) в целях повышения эффективности теплопередачи и снижения габаритов, металлоемкости и стоимости теплообменного оборудования;

экспериментальную отработку конструкции коллекторов, трубных досок, компенсаторов термических деформаций;

определение допускаемых скоростей изменения теплового состояния;

исследование влияния температурной неравномерности и разброса температуры на входах/выходах параллельных трубок (микроканалов) ТОМ по CO_2 ВД и НД;

исследование возможных перетоков CO_2 ;

экспериментальную отработку конструкции охладителей (конденсатора, охладителя конденсата) CO_2 НД;

исследование стойкости к окислению, загрязнению поверхности ТОМ и эрозионному воздействию потоков CO_2 ВД и НД;

разработку вариантов исполнения электропривода нагнетателя применительно к условиям

работы в среде CO_2 НД и регулирующих и запорных клапанов, исключающих утечки CO_2 из контура стендовой установки в окружающую среду;

отработку технологии изготовления ТОМ и оценку их стоимости в консервативном и инновационном вариантах исполнения;

предварительную оценку оптимальности исходных (проектных) значений температурных напоров в низконапорных точках и потерь давления $s\text{CO}_2$ и CO_2 НД;

предварительную отработку технологии продувки, заполнения контура CO_2 -ЭУ углекислым газом при пуске, откачки CO_2 из контура в емкости хранилища CO_2 при останове (прекращении работы) стендовой установки.

Микроканальные ТО в ряде публикаций зарубежных авторов рассматриваются как перспективное направление совершенствования теплообменного оборудования, в частности рекуператоров, в целях снижения их габаритов, металлоемкости и стоимости. На рис. 3 показаны некоторые варианты конфигурации поверхностей теплообмена МКТО [17, 18].

Поверхности теплообмена МКТО образованы стенками весьма узких каналов: круглых и профилированных трубок, катаных U-образных профилей, с прямыми и криволинейными/волнистыми трактами по греющему и нагреваемому теплоносителям, с “печатными” (вытравленными) каналами по технологии Printed Circuit Heat Exchangers) различной конфигурации и т.п. Ряды каналов выполнены в виде набора тонких панелей, приваренных одна к другой высокотемпературной диффузионной (например, лазерной) сваркой. Сварные швы при такой сварке получаются весьма прочными и газоплотными.

Снижение стоимости компактных теплообменников в научно-популярных публикациях и рекламных проспектах иногда связывают с внедрением аддитивных технологий производства металлических изделий или 3D-печати изделий из металлического порошка, несмотря на то что пока эти технологии применимы только для малых форм.

3D-технологии, реализуемые различными компаниями на запатентованном ими оборудовании, многочисленны, хотя все они работают по сходному принципу. Разные технологии отличаются одна от другой применением следующих операций:

дозирование порошка на каждый проход лазера, осуществляющего спекание порошка по координатам, переданным компьютером;

поддержание (фиксация) выращиваемой детали;

удаление лишнего порошка;

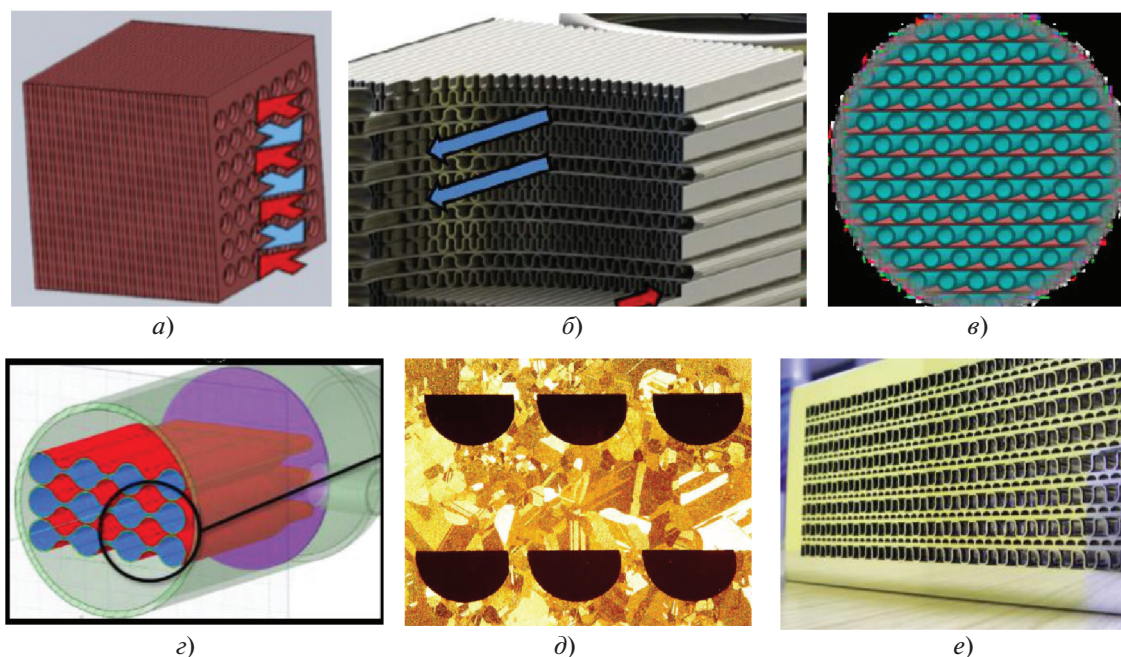


Рис. 3. Варианты конфигурации поверхностей нагрева МКТО.

a — пакетированные сваренные (спаянные) панели с отверстиями [19]; *б* — штампованные (отформованные) пластинчатые ТО; *в* — профилированные трубки; *г* — микротрубки; *д* — МКТО с печатными (вытравленными) U-образными каналами; *е* — комбинированный МКТО с печатными платами и U-образными ребрами

изоляция процесса от влияния кислорода воздуха (в некоторых установках процесс локализован в камере, наполненной азотом или аргонem);

обеспечение требуемых мощности и скорости движения лазера (чем выше скорость, тем ниже качество 3D-печати).

Добиться идеального соотношения производительности и качества — в этом суть секрета производства каждой компании.

Вместе с тем, в некоторых публикациях отмечается, что детали, произведенные с помощью лазерного спекания, не обладают монолитностью, а потому не достигают прочности, характерной для деталей, произведенных по схожим технологиям, например электронно-лучевой плавкой фирмы Ascam, не говоря уже об изделиях, произведенных из проката или отливок с последующей механической обработкой. Кроме того, технологии 3D-печати изделий из металлического порошка применимы только для изготовления изделий небольших размеров.

Что касается оценки стоимости изготовления ТОМ, то решение этой задачи позволит также предварительно уточнить исходные (проектные) значения температурных напоров в низконапорных точках и потерь давления в трактах по CO_2 и CO_2 НД. Так, например, повышение на 5–6% расхода CO_2 через высоко- и низкотемпературные теплообменные модули будет означать снижение

числа пар высоко- и низкотемпературных ТОМ, из которых будут состоять рекуператоры, на единицу. При сопоставлении достигнутого таким образом снижения стоимости рекуператоров с уменьшением расчетного КПД ОД CO_2 -ЭУ (вследствие увеличения потерь давления и температурных напоров в рекуператорах) и дисконтированного дохода от выработки энергии (при фиксированном подводе тепла из первичного источника) в течение всего срока службы будут определены и оптимальные значения указанных параметров.

Разработка рабочей конструкторской документации на ТОМ должна вестись практически параллельно с разработкой технологической документации и, естественно, должна быть увязана с планами и мероприятиями по технологической подготовке производства на предприятии — промышленном партнере, который возьмет на себя изготовление теплообменного оборудования ОД CO_2 -ЭУ. Сравнительная оценка стоимости изготовления ТОМ в консервативном и инновационном вариантах исполнения — это оценка экономической целесообразности применения новых технологий на предприятиях, выбранных в качестве промышленных партнеров.

Отставание России в разработке углекислотных энергоустановок от стран с развитой экономикой год от года увеличивается. Исследования, проводимые отдельными российскими предприятиями, разрознены и не координированы. Включение те-

мы “ТЭС на углекислотном рабочем теле” в Комплексную научно-техническую программу “Энергетика больших мощностей нового поколения”, поддержанную 03.06.2020 Советом 20Б Российской академии наук, позволяет надеяться на улучшение ситуации. В состав НИОКР по указанной теме в качестве первоочередных должны быть включены работы по созданию ОД CO_2 -ЭУ, в том числе строительство испытательных стендов и, в первую очередь, стендовой установки для испытаний теплообменного оборудования, экспериментальной отработке конструкции и технологии его изготовления. Для этого на уровне профильных министерств должны быть решены вопросы координации и адресного бюджетного финансирования этих НИОКР, определены промышленные партнеры. Чем скорее будут решены эти вопросы, тем раньше развитие данного перспективного направления в России будет сдвинуто с мертвой точки.

ОАО НПО ЦКТИ, имеющее богатый опыт разработки теплообменного оборудования ТЭС разного назначения и задел в области предпроектных исследований по созданию CO_2 -ЭУ разных видов и мощностей, готово к плодотворному сотрудничеству в проектировании указанной стендовой установки, составлению конструкторской документации и экспериментальной параметрической доводке опытных образцов ТОМ.

ВЫВОДЫ

1. Во всех развитых странах проводятся интенсивные исследования по созданию углекислотных установок (CO_2 -ЭУ) различного назначения, как правило, при активном участии государственного сектора, включая разработку государственных программ, адресное бюджетное финансирование, планирование и контроль выполнения работ. Основное внимание уделяется проблеме снижения металлоемкости и стоимости теплообменного оборудования.

2. На примере анализа целесообразности реконструкции отечественной ядерной энергетической установки с реактором на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем БН-1200 путем замены паросиловой части на CO_2 -ЭУ при начальной температуре рабочего тела перед турбиной (510°C) и температуре жидкого натрия ($\text{Na}_\text{ж}$) на входе/выходе подогревателя рабочего тела ($527/355^\circ\text{C}$), что и в базовом проекте, показано, что для энергоустановок большой мощности при умеренных начальных температурах указанная реконструкция приводит к снижению экономической энергоустановки вследствие резкого увеличения металлоемкости, габаритов и стоимости теплообменного оборудования и помещений для их размещения.

3. Повышение экономичности в сравнении с паротурбинными аналогами возможно при понижении единичной мощности. Целесообразно создать оборудование силовой части одного типа-размера (с унифицированным основным компрессором), предназначенное для использования в CO_2 -ЭУ малой мощности на объектах солнечной, атомной и тепловой энергетики.

4. Обязательной стадией разработки и постановки на производство оборудования силовой части CO_2 -ЭУ разных мощностей и назначения является создание опытно-демонстрационной CO_2 -ЭУ малой мощности, предназначенной как для экспериментальной отработки оборудования силовой части CO_2 -ЭУ и технологии эксплуатации, так и для проведения испытаний этого оборудования после освоения его производства.

5. Для решения проблемы снижения металлоемкости и стоимости рекуператоров ОД CO_2 -ЭУ необходимо создать стенд для испытаний теплообменных модулей, из которых будут набраны поверхности теплообмена рекуператоров ОД CO_2 -ЭУ. Стендовая установка должна обеспечивать точное воспроизведение условий эксплуатации ТОМ в составе рекуператоров ОД CO_2 -ЭУ.

6. Разработка рабочей конструкторской документации на ТОМ должна происходить параллельно с разработкой технологической документации и должна быть увязана с планами и мероприятиями по совершенствованию технологической подготовки производства на предприятии – промышленном партнере, который возьмет на себя изготовление теплообменного оборудования ОД CO_2 -ЭУ.

7. На начальном этапе НИОКР по реализации раздела “ТЭС на углекислотном рабочем теле” Комплексной научно-технической программы “Энергетика больших мощностей нового поколения”, поддержанной Советом 20Б РАН, в первую очередь, должны быть выполнены работы по созданию стендовой установки для испытаний ТОМ рекуператоров ОД CO_2 -ЭУ и по отработке технологии его изготовления. Для этого должны быть решены вопросы выбора промышленного партнера и бюджетного финансирования этих НИОКР.

8. ОАО НПО ЦКТИ, имеющее богатый опыт разработки теплообменного оборудования ТЭС разного назначения и задел в области предпроектных исследований по созданию CO_2 -ЭУ разных видов и мощностей, готово к плодотворному сотрудничеству в части проектирования указанной стендовой установки, подготовки конструкторской документации и экспериментальной параметрической доводки ТОМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Review** of supercritical CO₂ power cycle technology and current status of research and development/ Yoonhan Ahn, Seong Jun Bae, Min Seok Kim, Seong Kuk Cho, Seungjoon Baik, Jeong Ik Lee, Jae Eun Cha // Nucl. Eng. Technol. 2015. V. 47. № 6. P. 647–661. <https://doi.org/10.1016/j.net.2015.06.009>
2. **Dostal V., Driscoll M.J., Hejzlar P.** A supercritical carbon dioxide cycle for next generation nuclear reactors // Massachusetts Institute of Technology. Advanced Nuclear Power Technology Program. MIT-ANP-TR-100, 10 March 2004. [Электрон. ресурс.] <http://web.mit.edu/22.33/www/dostal.pdf>
3. **Аширметов М.Р.** Энергоблок с реакторной установкой БН-1200: Докл. на науч.-практ. конф. “Проектное направление “Прорыв”: результаты реализации новой технологической платформы ядерной энергетики”. Обнинск, 03–04.04.2015. [Электрон. ресурс.] <http://www.innov-rosatom.ru/files/articles/bd4b9dbcf191149c7a7186d67d73bbd4.pdf>
4. **Gas cycle testing opportunity with ASTRID, the French SFR prototype** / N. Alpy, L. Cachon, D. Haubensack, J. Floyd, N. Simon, L. Gicquel, G. Rodriguez, G. Avakian // Supercritical CO₂ Power Cycle Symposium. Boulder, Colorado, 24–25 May 2011. Dedicated paper. [Электрон. ресурс.] <http://atominfo.ru/files/atominfo/astridgas.pdf>
5. **Development** of a supercritical CO₂ Brayton energy conversion system coupled with a sodium cooled fast reactor / Jae-Eun Cha, Tae-Ho Lee, Jae-Hyuk Eoh, Sung-Hwan Seong, Seong-O Kim, Dong-Eok Kim, Moohwan Kim, Tae-Woo Kim, Kyun-Yul Suh // Nucl. Eng. Technol. 2009. V. 41. № 8. [Электрон. ресурс.] <https://doi.org/10.5516/NET.2009.41.8.1025>
6. **Sienicki J.J., Moiseyev A., Gerardi C.D.** Advanced energy conversion for sodium-cooled fast reactors (IAEA-CN245-022). Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, USA, 2017. [Электрон. ресурс.] https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/49/085/49085801.pdf?r=1
7. **Mendez Carmen M., Rochau Gary.** sCO₂ Brayton Cycle: Roadmap to sCO₂ Power Cycles NE Commercial Applications: Sandia report SAND 2018-6187. Sandia National Laboratories, 2018. [Электрон. ресурс.] <https://www.osti.gov/biblio/1452896-sco2-brayton-cycle-roadmap-sco2-power-cycles-ne-commercial-applications>
8. **Lead-cooled fast reactor (LFR). Risk and Safety Assessment.** White Paper / A. Alemberti, M.L. Frogheri, S. Hermsmeyer, L. Ammirabile V. Smirnov, M. Takahashi, C.F. Smith, Y. Wu, I.S. Hwang // Gen IV Intern. Forum. Risk & Safety Working Group, April 2014. Revision 8. [Электрон. ресурс.] https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2016-10/rswg_gfr_white_paper_final_2016.pdf
9. **Recent trends of supercritical CO₂ Brayton cycle: Bibliometric analysis and research review** / Aofang Yu, Wen Su, Xinxing Lin, Naijun Zhou // Nucl. Eng. Technol. 2021. V. 53. Is. 3. P. 699–714. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.08.005>
10. **Concentrated solar power projects.** DEWA CSP Tower Project // NREL transforming energy. 6 Febr. 2019. [Электрон. ресурс.] <https://solarpaces.nrel.gov/dewa-csp-tower-project>
11. **Moullec Y.L.** Conceptual study of a high efficiency coal-fired power plant with CO₂ capture using a supercritical CO₂ Brayton cycle // Energy. 2013. V. 49. P. 32–46.
12. **Conceptual designs of 50 MWe and 450 MWe supercritical CO₂ turbomachinery trains for power generation from coal. Part 1: Cycle and turbine** / R.A. Bidkar, A. Mann, R. Singh, E. Sevincer, S. Cich, M. Day, C.D. Kulhanek, A.M. Thatte, A.M. Peter, D. Hofer, J. Moore // Proc. of the 5th Intern. Symposium on Supercritical CO₂ Power Cycles. San Antonio, Texas, 28–31 March 2016.
13. **Conceptual designs of 50 MWe–450 MWe supercritical CO₂ turbomachinery trains for power generation from coal. Part 2: Compressors** / R.A. Bidkar, G. Musgrove, M. Day, C.D. Kulhanek, T. Allison, A.M. Peter, D. Hofer, J. Moore // Proc. of the 5th Intern. Symposium on Supercritical CO₂ Power Cycles. San Antonio, Texas, 28–31 March 2016.
14. **Key issues and solution strategies for supercritical carbon dioxide coal fired power plant** / J.L. Xu, E.H. Sun, M.J. Li, H. Liu, B.G. Zhu // Energy. 2018. V. 157. P. 227–246. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.162>
15. **Пат. РФ № 2702206.** Котлотурбинная диоксид-углеродная энергоустановка / М.А. Верткин // Б.И. 2018. № 28.
16. **Пат. РФ № 2740614.** Утилизационная углекислотная энергоустановка для установки комбинированного цикла / М.А. Верткин, С.Б. Есин, С.П. Колпаков, Ю.Г. Сухоруков // Б.И. 2021. № 2.
17. **Development** of modular, low-cost, high-temperature recuperators for the sCO₂ power cycles (DE-FE0026273) / L. Chordia, E. Green, D. Li, M. Portnoff, G. Musgrove, S. Cich, C.J. Nolen, A. Costanzo, K. Brun // University Turbine Systems Research Project Review Meeting. Blacksburg, Virginia, 2 Nov. 2016.
18. **Heat exchangers for supercritical CO₂ power cycle applications** / G.O. Musgrove, S. Sullivan, D. Shiferaw, L. Chordia, M. Portnoff, C. Pittaway, J. Carrero, R. Le Pierres, E. Vollnogle, E. Green // Proc. of the 5th Intern. Symposium on Supercritical CO₂ Power Cycles. San Antonio, Texas, 28–31 March 2016.
19. **Portnoff M., Vahdat V.** High temperature, recuperated sCO₂ Brayton power system. U.S. Department of Energy, 30 Oct. 2020. [Электрон. ресурс.] https://www.arpa-e.energy.gov/sites/default/files/2020-11/07_PO_04_HITEMMP_2020_Thar_Portnoff_EnergyCleared_for_posting.pdf

Carbon Dioxide Power Systems: Research Lines at Initial Design Stages and Application Prospects in Russia

M. A. Vertkin^{a,*}, P. V. Egorov^a, S. B. Esin^a, **S. P. Kolpakov^a**, V. E. Mikhailov^a, and Yu. G. Sukhorukov^a

^a OAO Polzunov Scientific and Development Association on the Research and Design of Power Equipment (OAO NPO CKTI), St. Petersburg, 191167 Russia

*e-mail: VertkinMA@ckti.ru

Abstract—Carbon dioxide power systems (CO₂-PS) are thermal power facilities in which carbon dioxide (CO₂) is used as a working fluid. Given a fairly high initial temperature upstream of the turbine, their efficiency may be higher than that of steam turbine analogs. In all developed countries, intense studies aimed at development of CO₂-PSs for various purposes are carried out, as a rule, with active participation of the state sector, including the development of state programs and addressed budgetary financial support, with the majority of R&D works carried out in the capacity of national laboratories and research institutes, with planning the works and monitoring their progress. Special attention is paid to solving the problem of decreasing the metal intensity and cost of heat-transfer equipment. It is shown—taking as an example a feasibility study of modifying the domestically developed 1200 MW sodium-cooled fast nuclear power facility by replacing the steam power plant by a CO₂-PS—that such modification for large capacity power plants with moderate initial temperature levels results in degraded economic efficiency as a consequence of much higher metal intensity, larger overall dimensions, and cost of the heat-transfer equipment. Better economic efficiency in comparison with similar steam turbine plants can be achieved by increasing the initial temperature and decreasing the capacity of a single power unit. At the initial design stages, it is advisable to place the focus on developing a small capacity power part equipment of one standard size (with a standardized main compressor) intended for being used in CO₂-PS at solar, nuclear, and thermal power facilities. The development of an experimental demonstration (ED) small-capacity CO₂-PS intended for carrying out tests and experimentally perfecting the equipment and technology of its operation is a mandatory stage in the development of CO₂-PSs for different capacities and purposes. For decreasing the cost of ED CO₂-PS recuperators, it is necessary to construct a bench for testing the heat-transfer modules (HTMs) of which the CO₂-PS recuperators will be assembled. A basic thermal cycle circuit of the bench facility that will accurately replicate the operation conditions of HTMs as part of the ED CO₂-PS recuperators is developed. The tasks that have to be solved based on the experimental study results are described, and examples of the schematic diagrams of microchannel heat exchangers using which the HTMs can be made more compact are given. Detailed design documents for HTM equipment shall be developed in coordination with the development of technological documentation and plans for improving the technological preparation of manufacture at the industrial partner enterprise that will undertake the task of producing the ED CO₂-PS heat-transfer equipment.

Keywords: supercritical carbon dioxide Brayton cycle, carbon dioxide power system, experimental demonstration power system, recompressing, recuperator, heat exchanger, heat-transfer module, heat-transfer module testing bench, microchannel heat exchangers