

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Kremer H., Mechenbier R., Schulz W. Staged combustion of pulverized coal // Fundamentals of the physical-chemistry of pulverized coal combustion. - Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, 1987.- P. 304-320.
2. Котлер В.Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов. - М.: Энергоатомиздат, 1987.- 144 с.
3. Jüntgen H. Coal characterization in relation to coal combustion // Fundamentals of the physical-chemistry of pulverized coal combustion. - Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, 1987.- P. 4-58.
4. Бабий В.И., Куваев Ю.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. - М.: Энергоатомиздат, 1986.- 208 с.
5. Prado G., Froelich D., Lahaye J. Heterogeneous combustion of residual coke particle // Fundamentals of the physical-chemistry of pulverized coal combustion. - Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, 1987.- P. 219-244.
6. Основы практической теории горения // Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б. и др.- Л.: Энергоатомиздат, 1986.- 312 с.
7. Abbas T., Costa M., Costen P., Godoy S., Lockwood F.C., Ou J.J., Romo-Millares C., Zhou J. NO<sub>x</sub> formation and reduction mechanisms in pulverized coal flames // Fuel.- 1994.- N 73.- P. 1423-1436.
8. Виленский Т.В., Хзмалян Д.М. Динамика горения пылевидного топлива. – М.: Энергия, 1977.- 248 с.
9. А.С.1580114 СССР. Пылеугольная топка / Заворин А.С., Некряч Е.Н., Курганов А.К. - № 4430006/24-06; Приоритет 25.05.88; Опубл.23.07.90.

Научный руководитель: А.С. Заворин, д.т.н., профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

## **МОДЕРНИЗАЦИЯ УГОЛЬНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА В УСЛОВИЯХ ЧЕТВЕРТОГО ЭНЕРГОПЕРЕХОДА**

А.Э. Риф, В.В. Цветкова, А.Ю. Кайдашова  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5071

В 2015 году было принято Парижское соглашение, основной целью которого является усиление глобального реагирования на угрозу изменения климата. Данное соглашение стало импульсом к снижению доли углеводородной энергетики в общем мировом энергобалансе. В рамках инициативы по достижению цели сокращения выбросов парниковых газов на 55% к 2030 году и достижения их нулевого уровня к 2050 году 14 июля 2021 года Европейская комиссия представила проект пакета климатического законодательства. В рамках проекта предлагается внедрение трансграничных углеродных налогов (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM), что является серьезным вызовом для России – одного из крупнейших поставщиков нефти, газа и угля в мире.

В условиях IV-го энергоперехода для России критически важно сохранить текущую долю рынка энергоресурсов. А также обеспечить сокращение издержек на их производство. В условиях мировой тенденции к уменьшению углеродного следа это может быть достигнуто за счет создания и применения новых технологических решений.

Уголь – доминирующее стратегическое сырье, обеспечивающее дешевой энергией развивающиеся страны. Несмотря на это, он является одним из основных источников выбросов CO<sub>2</sub>, что влечет за собой усиление парникового эффекта, таяние ледников и грунтов вечной мерзлоты. Однако, по оценкам экспертов, самые неблагоприятные прогнозы сохраняют долю угля в мировом энергобалансе 19-23% к 2040 году [1].

Таким образом, перед Россией стоит задача не только сохранения, но и преумножения потенциала угольного топлива, решить которую позволит внедрение комплексных экоэнергетических систем полного жизненного цикла топлива с возможностью утилизации небалансовых остатков CO<sub>2</sub>.

В настоящей работе предлагается техническое решение, основанное на внедрении на существующую ГРЭС современных технологий газификации угля и цикла Аллама.

Технология горновой газификации прошла опытно-промышленные испытания на экспериментальном образце на Томской ТЭЦ-3 в условиях максимально близких к индустриальным [2]. Полученные в ходе испытания характеристики синтез-газа подтверждают возможности его эффективного энергетического применения взамен неэкологичного прямого сжигания. Однако при использовании синтез-газа в традиционном паротурбинном или газотурбинном цикле сохраняется негативное воздействие на окружающую среду в виде дымовых газов, содержащих CO<sub>2</sub>.

Полное экологичное замыкание жизненного цикла угля в предлагаемой схеме (рис.1) достигается за счет сочетания горновой газификации с технологическими решениями цикла Аллама. А также предлагается использование выхлопных газов из котла-утилизатора и переработка золы и шлама. Сжигание синтез-газа осуществляется с кислородом, выхлопными газами и горячей рециркулируемой сверхкритической рабочей флюидом CO<sub>2</sub> под высоким давлением в камере сгорания.



Таблица 1. Исходные параметры

Параметры на входе в турбину	$p_o = 300$ бар $t_o = 1300^\circ\text{C}$
Параметры на выходе из турбины	$p_k = 30$ бар
Мощность турбины	$N = 50$ МВт
Расход угля в газификатор	$G_{\text{угля}} = 1,1$ кг/с
Расход выхлопных газов	$G_{\text{в}} = 0,5$ кг/с
Температура охлаждающей воды	$t_{\text{охл}} = 20^\circ\text{C}$

По приближенным экономическим оценкам капитальные затраты на строительство дополнительного блока Кемеровской ГРЭС составят 10,3 млрд руб. Эксплуатационные затраты – 322,2 млн руб./год. За счет увеличения мощности и продажи водорода произойдет увеличение годового дохода предприятия с выручки электроэнергии от 1,46 до 3,1 млрд руб./год [4]. Таким образом, срок окупаемости предлагаемой модернизации составит 6,7 лет.

Основными рисками внедрения добавочного цикла является практическая нереализуемость какого-либо технического решения и отсутствие возможности встроиться в существующую технологическую схему.

К положительным социальным последствиям можно отнести улучшение здоровья населения, а также улучшение качества жизни населения Кузбасса – одного из самых экологически неблагоприятных регионов России. С точки зрения экологии необходимо отметить уменьшение углеродного следа, переработку отходов ГРЭС, а также увеличение площади известняковых пород.

Таким образом, предлагаемое решение является актуальным, экономически выгодным, а главное – экологичным и реальным для РФ в условиях IV-го энергоперехода. А в перспективе может стать трансфером высотехнологического оборудования в страны Азии, Африки, Южной Америки и драйвером развития отечественного среднего и тяжелого машиностроения, что позволит снизить зависимость от экспорта ресурсов.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Бриллиантова В.В., Галкин Ю.В., Галкина А.А. и др. Прогноз развития энергетики мира и России 2019 // под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина; ИНЭИ РАН–Московская школа управления СКОЛКОВО – Москва, 2019. – 210 с. - ISBN 978-5-91438-028-8
2. Ryzhiy, I.A., Shtegman, A.V., Tugov, A.N. et al. Pilot Tests of a Fixed-Bed Coal Gasifier//Thermal Engineering. 2021. 68, 461–472.
3. Allam R., Martin S., Forrest B. et. al. Demonstration of the Allam Cycle: An update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture//Energy Procedia. 2017.114, 5948-5966.

4. О годовой бухгалтерской отчетности. [Электронный ресурс] : Раскрытие информации в соответствии со «Стандартами раскрытия информации теплоснабжающими организациями, теплосетевыми организациями и органами регулирования», утвержденными постановлением Правительства РФ от 05.07.2013 № 570 – Режим доступа: <https://sibgenco.ru/about/disclosure/filter/type-is-raskrytie-informatsii-v-sootvetstvii-so-standartami-raskrytiya-informatsii-teplosnabzhayushchimi-org/>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения 10.10.2021).

Научный руководитель: В.Е. Губин, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

## **СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВИЭ НА РАБОТУ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ**

Н.В. Стецов

Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н.Бутакова, группа 5091

Современное общество сталкивается с новыми проблемами [1], особо сложными на стыке наук, решение которых возможно только с учетом взаимосвязей объектов реального мира. Поэтому системность становится одним из главных аспектов практической деятельности, она обеспечивает эффективные способы преодоления проблемных ситуаций с использованием системных исследований, реализуемых на основе системного подхода.

Также, системный подход к созданию энергетических систем имеет широкое применения на практике. Авторы современных научных статей уделяют особое внимание проблемам внедрения ВИЭ в системы энергопотребления и производства электроэнергии разных стран. Таким образом, организация системного инжиниринга позволит установить долю ВИЭ в производстве электроэнергии определённого региона.

Для квалифицированной и окупаемой себя системы необходимо выявить стейкхолдеров (лиц, заинтересованных в данном проекте посредством получения какой-либо выгоды). Следовательно, при выявлении данных лиц можно найти оптимальное решение с учётом критериев для нашей системы.

Кроме того, в задачи реализации проекта входит: анализ его полезности и востребованности в течение всего жизненного цикла. Для этого требуется произвести предварительную оценку производительности, определить потребители и их требования к качеству продукции.

Инжиниринг энергетических систем включает прогнозирование роста потребления и развития генерирующих мощностей. Определение выработки требует учета не только технической составляющей, но и экономических показателей в комплексе с нетехнологическим окружением данного объекта-системы.