

УДК 621.165:621.438: 662.9

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В ГИБРИДНОЙ ПГУ

*Гордеев С.И., Вальцев Н.В., Богатова Т.Ф., Чернявский Н.В.,  
Микула В.А., Рыжков А.Ф.*

*Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург  
Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, г. Киев*

Модернизация национальной экономики ставит сложные задачи по замещению парка морально устаревшего и изношенного оборудования современными высокоэффективными технологиями. В регионах, богатых газонефтяными ресурсами эта проблема решается путем постройки парогазовых установок. Неравномерность распределения месторождений заставляет решать сложные многогранные задачи высокоэкономичного и экологически чистого использования угля. Применение твердотопливных парогазовых установок сдерживается их пониженной по отношению к газотопливным энергетической эффективностью (рис. 1). Преодоление отставания идет по нескольким путям: в установках с внутрицикловой газификацией

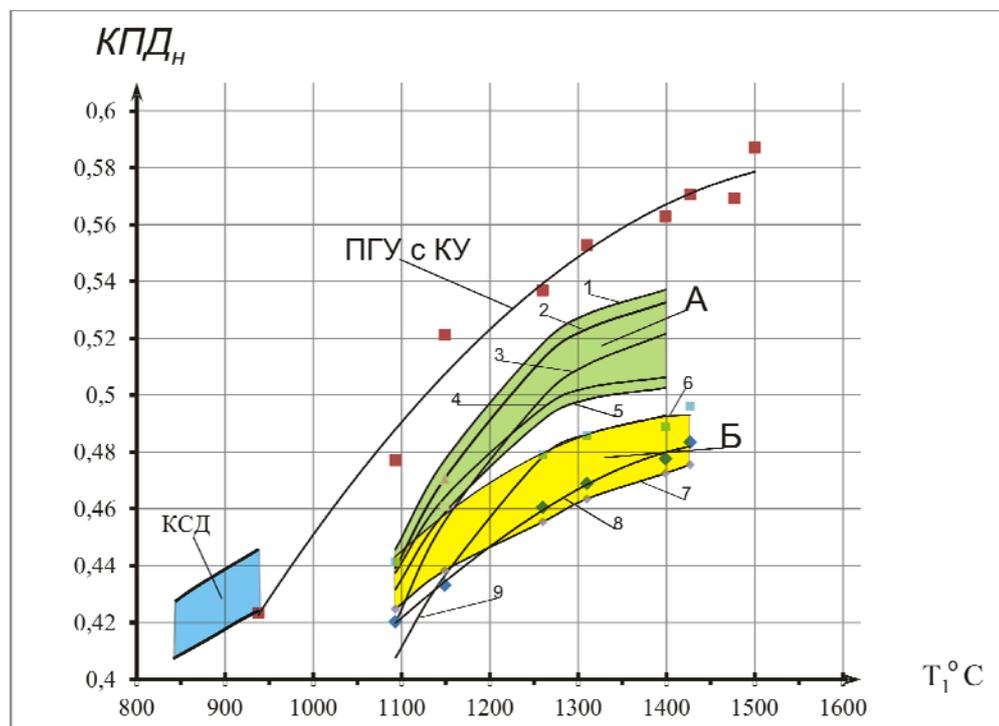


Рис. 1 Энергетическая эффективность парогазовых установок. А – область гибридных ПГУ (1,2,4,5 – ИЦЭУ-УрФУ; 3 – Foster Wheeler; 9 – АВГС) ; Б – IGCC (6,7 – соответственно кислородная IGCC с холодной и горячей газоочисткой; 8 – воздушная IGCC с холодной газоочисткой), точки – результаты расчета в Thermoflow

(IGCC) – снижение затрат на подготовку рабочего тела газовой турбины, в частности удешевление производства технического кислорода, замена его на воздух, переход к горячей системе газоочистки. Другой путь – использование гибридных парогазовых установок (ГПГУ).

Построение ГПГУ может быть различным. Ниже рассматриваются особенности топливоиспользования разработки ИЦЭУ-УрФУ (рис.2) в сравнении с известными альтернативами (схемы Foster Wheeler, ABGC). Расчетные характеристики ГПГУ разработки ИЦЭУ-УрФУ приведены в табл. 1. Для расчетов был выбран типоряд газотурбинного оборудования в соответствии с возможностью работы на синтез-газе. КПД паротурбинной части принят в соответствии с рекомендациями программного пакета Thermoflow на основе расчета IGCC, показатели собственных нужд гибридной ПГУ, ввиду отсутствия реальных данных, приняты завышенными против IGCC ~ в 2 раза.

Таблица 1

Расчетные характеристики гибридной ПГУ ИЦЭУ-УрФУ

ГТУ	SGT 900	SGT5-2000E	GE 9281F	SGT5-4000F	Mitsubishi M701F	GE 9391G
Начальная температура, °С	1093	1149	1260	1310	1399	1427
КПД газовой турбины, %	32.2	34.8	35.5	37.3	38.4	39.5
КПД паротурбинной установки с котлом-утилизатором, %	40.16	42.68	47.61	46.94	48.38	47.11
КПД ПГУ, %	44	47	51	52	53	54
Собственные нужды, %	10	10	10	10	10	10
К <sub>ПГУ</sub>	0.52	0.54	0.527	0.54	0.55	0.57

Разработка основана на применении гибридного принципа сжигания: «внешнего» – в воздушном котле и «внутреннего» в узле догрева ГТУ, что позволяет упростить газоподготавливающую часть ГПГУ. Использование такого решения нивелирует недостатки ПГУ с «внешним» сжиганием, а по сравнению с IGCC существенно уменьшить габариты аппаратов конверсии топлива и последующей очистки топливного газа при наличии дополнительно потока топлива в воздушный котел, не проходящего термохимическую подготовку.

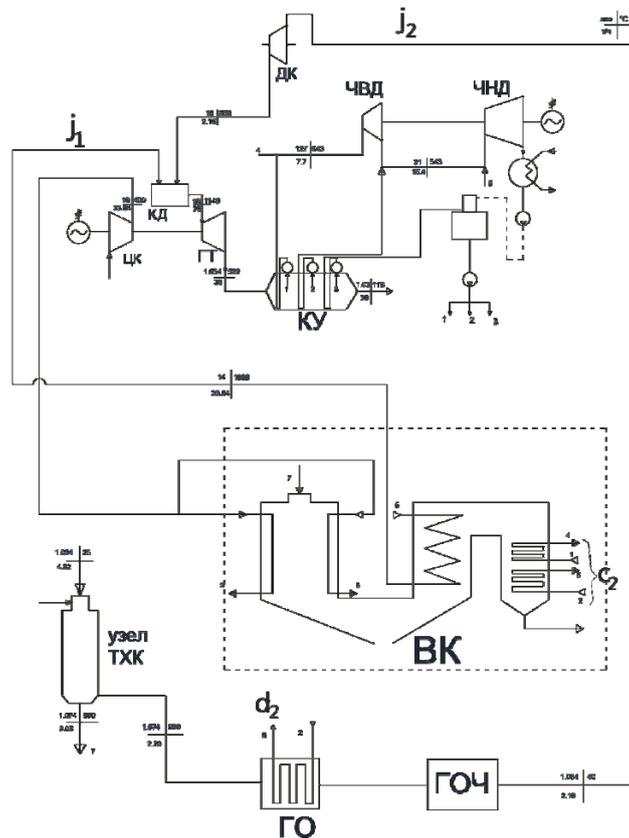


Рис. 2 Технологическая схема гибридной парогазовой установки. ЦК – цикловый компрессор; ГТ – газовая турбина; КД – узел (камера) догрева; КУ – котел утилизатор; ВК – воздушный котел; ГО – газохладитель; ГОЧ – система газоочистки; ДК – дожимной компрессор; ЧВД – часть высокого давления паровой турбины; ЧНД – часть низкого давления паровой турбины

Для высокотемпературного нагрева используется радиационно-конвективный пылеугольный котел. В отличие от обычного котла в основной части поверхностей нагрева циркулирует цикловый воздух. Остаточная теплота утилизируется в паровом цикле с генерацией пара высокого и среднего давления.

Расчет показывает, что с ростом параметров газотурбинной части ( $T_1$ ) происходит перераспределение потоков теплоты (рис. 3). В соответствии с технологической схемой (рис. 2) кривые рис. 3 характеризуют относительные потоки теплоты в схеме ГПГУ. Линия  $j_1$  обозначает количество теплоты, вносимой в узел догрева с нагретым цикловым воздухом. С ростом температуры удельный вес потока  $j_1$  снижается вследствие увеличения расхода теплоты во всей схеме при неизменности температуры нагрева, одновременно снижается расход окислителя при фиксированной мощности газовой турбины. Кривая  $j_2$ , характеризующая поток топливного газа с увеличением температуры монотонно возрастает. Совместно с ней растет поток пара из газохладителя узла конверсии  $d_2$ . Величина  $c_2$  – энергия парового потока из утилизационной части воздушного котла – повторяет динамику  $j_1$ .

При переходе к регенеративной схеме ГПГУ происходит перераспределение потоков в сторону снижения топливной нагрузки на воздухо-нагреватель (штриховые линии).

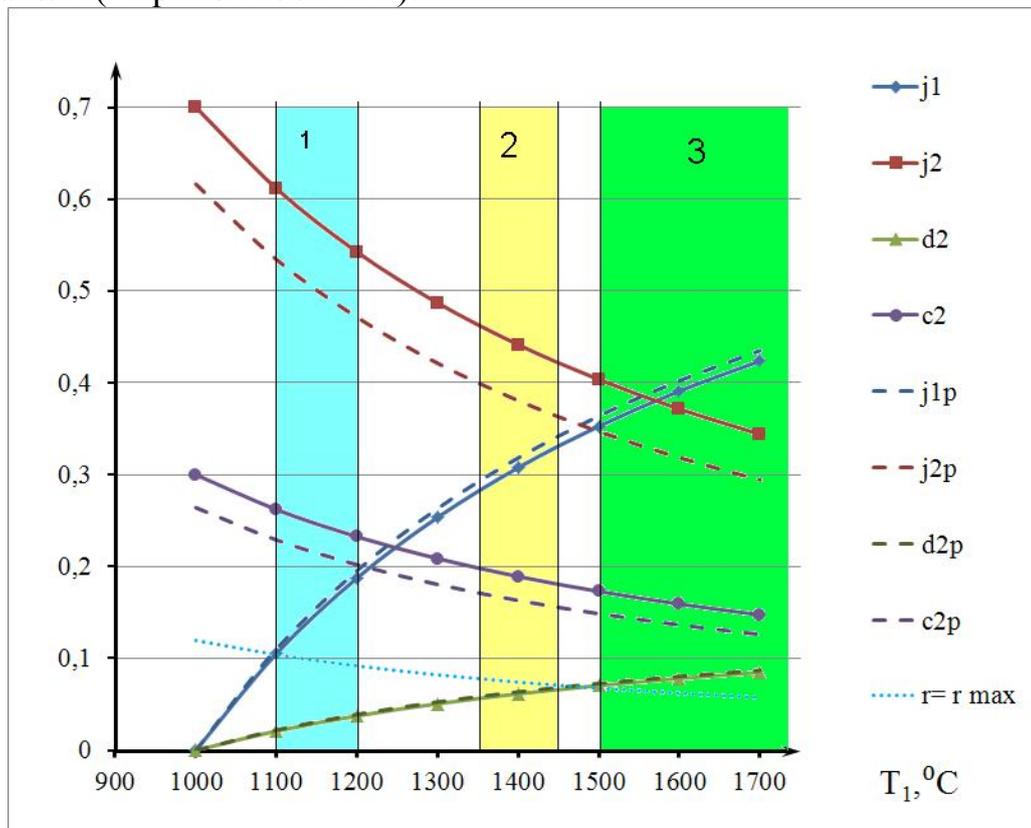


Рис. 3 Распределение тепловых потоков в ГПГУ в зависимости от начальной температуры

При минимальной температуре  $T_1 = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$  установка работает без включения газоподготавливающей части, при  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$  соотношение энергетического потенциала циклового воздуха и топливного газа равны.

В связи с уменьшением нагрузки на газоподготавливающую часть ГПГУ, к ней предъявляются меньшие требования по сравнению с IGCC. В зависимости от начальных параметров газотурбинной части технические решения по устройствам конверсии могут быть различными. Наиболее подходящими в выделенных областях являются следующие типы реакторов:

- $T_1 = 1100\text{-}1150 \text{ }^\circ\text{C}$  низкотемпературные устройства безокислительного пиролиза (область 1);
- $T_1 = 1350\text{-}1450 \text{ }^\circ\text{C}$  – низкотемпературные установки частичной газификации (область 2);
- $T_1 > 1500$  установки безостаточной высокотемпературной газификации (область 3).

Предлагаемые типы реакторов поточного типа. Устройства, работающие по режиму 1 и 2, атмосферного типа с твердым шлакоудалением.

Пиролизер [1] работает в режиме безокислительного пиролиза, осуществляемого за счет сжигания в головной части выделяемой жидкой смолистой фракции. Он производит обогащенный продуктами пиролиза топливный газ с низким содержанием азота ( $N_2 < 10\%$ ) и относительно высокой теплотой сгорания  $\sim 11-12$  МДж/м<sup>3</sup> и полукокс со степенью дегазации более 65%. Процесс осуществляется за счёт сжигания в головной части реактора смол, выделяемых из продуктов конверсии ( $\sim 10\%$  от подводимого топлива). Достоинствами пиролизного реактора являются надежность и простота ведения процесса и конструктивного оформления, доказанные длительной эксплуатацией подобных устройств на промышленном энергетическом оборудовании. С увеличением  $T_1$  применение схем «мокрой» газоочистки при практически полной потере физического тепла топливного газа, характерной для таких установок, негативно сказывается на энергетической эффективности всей ПГУ, поэтому использование режима пиролиза в узле конверсии ограничено областью 1 рис. 3.

Установка частичной газификации аналогична по устройству пиролизному реактору с отличием по конечному продукту. В результате получают «бессмольный» топливный газ ( $CH_4 < 1\%$ ) и пылевидный полукокс, активированный в пароуглекислотной среде. Более сложная схема управления процессом и конструкция реактора компенсируется эксплуатационными преимуществами, связанными с отказом от парового дутья и от «мокрых» систем газоочистки, повышением термической эффективности конверсии. Физическая теплота топливного газа утилизируется в паровом цикле.

При переходе в область 3 рис. 3 поток теплоты, вносимый с топливным газом, становится соизмеримым с тем количеством, которое подводится в воздушном котле, поэтому применение аппаратов частичной газификации становится нецелесообразным. Оправданным в таком случае становится применение установок быстрой высокотемпературной конверсии по технологии ИВЕ НАН Украины.

На данный момент работающие в мире твердотопливные парогазовые установки в качестве топлива используют кондиционные энергетические угли либо нефтекокс. Ведутся поисковые исследования возможности работы реакторов на местных топливах. Ситуационный график (рис. 4) отражает результаты обработки нормативных и справочных данных по теплоте сгорания топлива перед подачей его в топку с готовой влажностью.

Для упрощенной низкотемпературной конверсии с получением пиролизного газа для догрева циклового воздуха наиболее подходят высокореакционные топлива со средним выходом коксового остатка, занимающие на топливной шкале промежуточное положение (бурые угли с  $O/C=0,2-0,4$ ). Утилизация неиспользованной в пиролизере жидкой фракции осуществляется путем сжигания в топке воздушного котла.

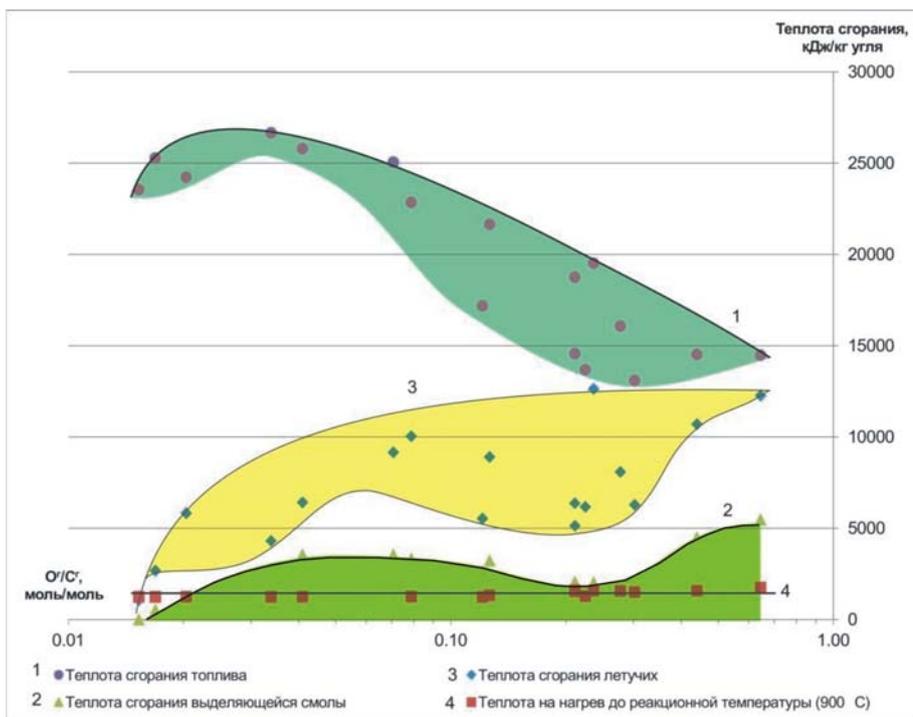


Рис. 4 Оценка распределения теплоты сгорания топлива по составляющим термического анализа

Топлива с умеренным выходом смол представляют идеальный вариант для окислительного пиролиза (частичной газификации), проводимого за счёт тепла, выделяемого при сжигании смолистых продуктов в головной части реактора. В этом случае из реактора в котёл на утилизацию поступают два потока – раскалённый кокс (на дожигание) и подсмольные воды.

Топлива, дающие низкий выход нелетучего углерода и значительный выход газа и жидких продуктов (торф, древесина,  $O/C=0,4-0,6$ ), целесообразно конвертировать по технологии высокотемпературной безостаточной газификации с работой воздушного котла на независимом топливе.

Одним из наиболее ответственных узлов ГПУ является устройство высокотемпературного нагрева воздуха – воздушный котел. Он позволяет эффективно передавать тепло, выделяющееся при сжигании, «чистым» рабочим средам для перспективных турбин, работающих при температуре  $1480^{\circ}\text{C}$ , а также воздуху и другим газам, используемым в перспективных процессах. Ставится задача нагреть воздух перед ГТУ до  $700-1000^{\circ}\text{C}$  за счет теплоты, выделяющейся при сжигании твердого топлива (полукокс или уголь); выбор оптимальной конструкции ВВЗН был выполнен на основе литературного обзора. При выборе конструкционного материала учитывалось, что керамические материалы (имеющие самый высокий уровень максимальной температуры) не обеспечивают газоплотности конструкции даже при небольших избыточных давлениях, поэтому остановились на сталях.

Наибольшей жаростойкостью обладают стали, легированные хромом, при содержании его 25-30% максимальная температура для жаропрочных сталей достигает 1000-1100°C. Для защиты оборудования из углеродистых и легированных сталей от окисления и коррозии при высоких температурах, а также от действия горячих агрессивных сред успешно применяют силикатные эмалевые покрытия.

Для достижения требуемой температуры подогрева воздуха (700-1000°C) в воздухонагреватель должен иметь 2 секции: конвективную и радиационную. Использование более компактных регенеративных или пластинчатых конструкций для конвективной секции неприемлемо, прежде всего, потому, что в продуктах сгорания присутствуют частицы золы, а указанные конструкции плохо приспособлены для очистки. В результате, для конвективной секции выбрана рекуперативная конструкция из стальных труб.

Для оптимизации конструкции радиационной части ВВЗН было проведено поисковое исследование (в пакете ANSYS CFX) в области теплообмена в трубах со вставками. В результате моделирования было получено распределение температур по длине и радиусу трубы (рис. 5).

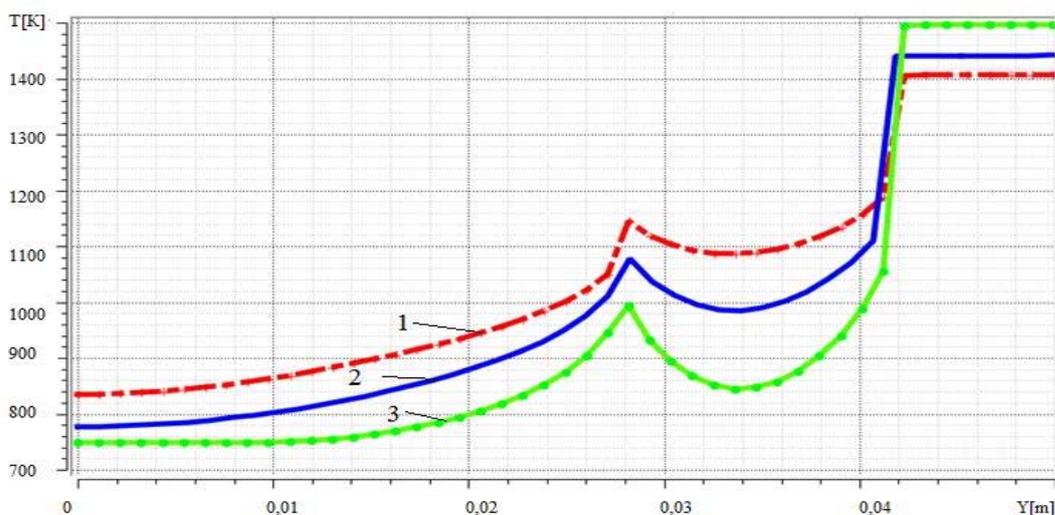


Рис. 5 Распределение температур сред в модели трубы со вставкой в радиальном направлении: 1 – X = 0.5м, 2 – X = 1м, 3 – X = 1.5 м

Газы низкотемпературной конверсии на основе воздушного дутья имеют широкий спектр теплот сгорания: от 0,7 – 2 (полугазы муфельных растопочных горелок, воздушный генераторный газ) до 10 – 20 МДж/м<sup>3</sup> (сухие продукты воздушного окислительного пиролиза) и соответствующие им теоретические температуры горения. На рис.6 изображён график зависимости расчётной теоретической температуры горения (с учётом диссоциации и начальной температуры) этих групп искусственных газов, сгорающих после прохождения дожимного компрессора в высокотемпературном (1000 °C) воздушном потоке, от теплоты сгорания.

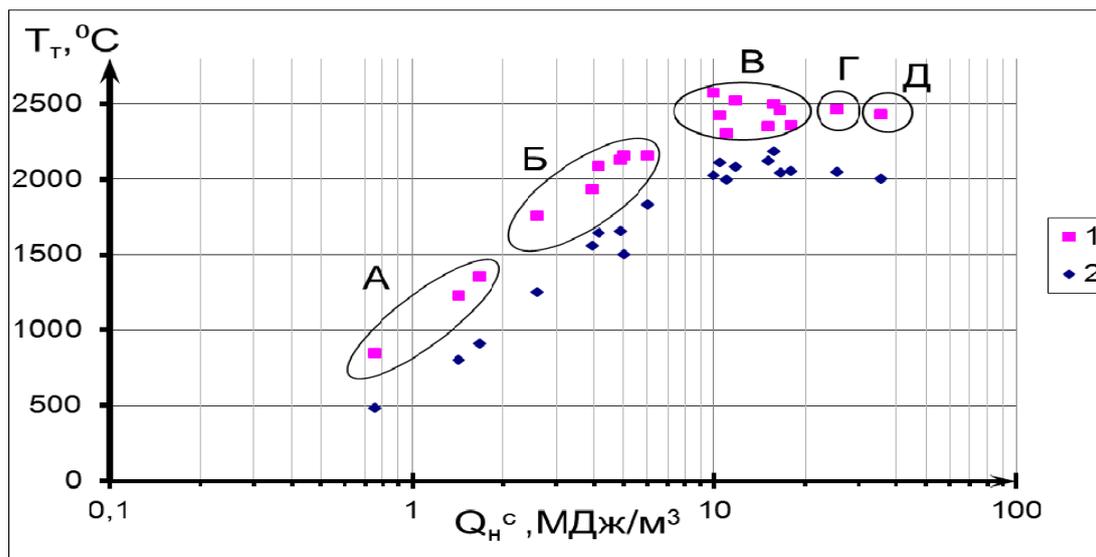


Рис. 6 Теоретическая температура горения искусственных газов. 1- для условий гибридной ПГУ; 2 – адиабатная температура  $T_0^T$  горения искусственных газов. Рабочие участки (характеристики): А – продувочные газы типа ваграночного; Б – газы воздушной газификации; В – газы окислительного и безокислительного пиролиза; Г – полукоксовые газы; Д – природный газ

При сжигании в условиях ГПГУ проблемы срыва факела и неустойчивости горения не возникает. Сжигание наиболее «бедных» газов из области А (типа доменного, ваграночного) будет автоматически протекать в режиме изотермического беспламенного горения типа flameless. Низкая температура горения таких газов не предусматривает контроля за выбросами  $NO_x$ . При сжигании газов частичной газификации и пиролиза (области Б и В) необходимо применение дополнительных мер по предупреждению образования  $NO_x$ , что усложняет конструкцию узла догрева газовой турбины.

Предложенные угольные ПГУ гибридного типа с воздухонагревателем занимают по энергетической эффективности промежуточное положение между ПГУ с котлом-утилизатором и ПГУ-IGCC. По экономической эффективности она сопоставима с IGCC на воздушном дутье. Отказ от газификаторов под давлением и кислорода позволяет уменьшить расход электроэнергии на собственные нужды на 1,5–2,5 % (абс.).

## Литература

1. Шульман В.Л., Зайцев А.В., Богатова Т.Ф. Развитие угольных парогазовых технологий // Технологии эффективного и экологически чистого использования угля: Сборник докладов международной научно-технической конференции. – М.: «ОАО ВТИ», 2009. С. 246-251