

МОДУЛЬНЫЕ РЕАКТОРЫ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ И НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГИБРИДНЫХ УГОЛЬНЫХ ПГУ

А. Ф. Рыжков^{1,2}, В. Л. Шульман^{1,2}, В. Е. Силин^{1,2},
Т. Ф. Богатова^{1,2}, Р. Ш. Загрудинов^{2,3}

¹Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

²ООО «Универсальная энергия», Екатеринбург, Россия

³ЗАО «Концерн «ЕвразЭнергопром»», Екатеринбург, Россия

Многие годы творческий коллектив сотрудников кафедры тепловых электрических станций Уральского энергетического института в составе УрФУ совместно со специалистами Инженерного центра энергетики Урала (предприятие УралОРГРЭС), ЗАО «Концерн ЕвразЭнергопром», а также учёными Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН занимается вопросами разработки технологии термохимической подготовки твёрдых топлив для сжигания в энергетических установках (паровых и водогрейных котлах, ПГУ, ТЭЦ-ДВС) и для синтезов на предприятиях по производству синтетических жидких топлив. Основная задача работ: разработка промышленной технологии и создание опытных образцов низкотемпературных установок для получения из низкосортных местных топлив искусственного газа, пригодного для производства электроэнергии и синтетических жидких топлив.

Проект представляет итог длительных и разнообразных НИОКР, опытно-промышленных внедрений, пусконаладочных испытаний и т.п., направленных на совершенствование термохимической конверсии (ТХК) твёрдых топлив с целью оценки термической и экономической эффективности их использования в сфере предприятий энергетики и органического синтеза.

При выборе магистрального направления разработок из двух основных:

- разработка мощных (до 1-1,5 ГВт) реакторов под давлением (2-6 МПа) для энергетики и химических заводов, работающих на кислороде (доминирующее направление в современной газогенераторостроении);
- создание малых низконапорных воздушных реакторов на базе местных топливных ресурсов (альтернативное направление, развиваемое для распределённых систем полигенерации (электрической и тепловой энергии, жидких топлив и пр.)

решено было сконцентрироваться на втором.

Применение таких установок (1-25 МВт по исходному топливу) наряду с решением локальных задач энергообеспечения позволяет решать и региональные задачи, создавая модульно наращиваемые мощности по 0,5-5 МВт, 25-50 МВт и 100-250 МВт полезной мощности в электрической, тепловой или химической форме.

Основная цель замены крупномасштабных реакторов группой малоразмерных аппаратов очевидна. Это необходимость максимального уменьшения и технического облегчения всего узла получения горючего газа из твёрдого топлива, включающего как сам реактор ТХК, так и газохимический комплекс по доводке газа-сырья до требований газопотребителя (охлаждение, очистка).

Прообразами разрабатываемых конструкций служили малые атмосферные газогенераторы XIX – первой половины XX века, вертикальные циклонные предтопки паровых котлов с ЖШУ середины XX века, энерготехнологические установки разработки

ЭНИН (Калининская ОПУ, Красноярская ЭТХ-175), горелочные устройства с предварительной термохимической подготовкой угольной пыли перед вводом в топку и ряд других разработок ОРГРЭС.

Малые слоевые газогенераторы появились в XIX – первой половине XX века, когда с их помощью путем создания широкой сети локальных и групповых установок решались проблемы коммунальной и промышленной теплоэнергетики ранней фазы индустриализации общества. В России основным разработчиком малых промышленных газогенераторов являлся базирующийся в Екатеринбурге ВНИИМТ, с которым у ряда членов коллектива были тесные производственные отношения. К настоящему времени они, будучи технически и экологически несовершенными по сравнению с агрегатами большой мощности, повсеместно демонтированы. Однако технология низкотемпературной газификации в плотном слое себя не исчерпала.

Применение предтопок в высокотемпературном режиме с ЖШУ себя не оправдало, однако перенос опыта на низкотемпературный процесс окислительного пиролиза вполне уместен. Не менее ценен опыт работы технологической топки на Калининской ОПУ, за деятельностью которой внимательно следили участники проекта.

Разработанные специалистами ОРГРЭС устройства предварительной термической подготовки угольной пыли мощностью 10-25 МВт в промышленных условиях показали положительные результаты. К настоящему времени не существует других практически пригодных и апробированных в реальных условиях конструкций ТХК.

Исторически разработка технологии низкотемпературной ТХК в поточном реакторе проводилась в коллективе по двум основным направлениям:

- с ТХК в реакторе с охлаждаемыми стенками по образцу стандартных горелочных устройств (ОРГРЭС);
- с ТХК в адиабатном реакторе (на примере футерованной муфельной растопочной горелки ТЭС).

Как показал исторический опыт, более перспективным для постоянной работы оказалось первое направление. Разработка восходит к 70-80 гг. XX века, когда специалистами УралОРГРЭС испытывались на паровых котлах ПК-57 и модернизировались двухканальные (по вторичному воздуху) угольные горелки с отдельным регулированием каждого из концентрических потоков (авторское свидетельство №130034).

В 70-80-е годы XX в. в УралОРГРЭС исследовалась возможность создания оптимальных условий выгорания твёрдого топлива и снижения выхода оксидов азота. Было предложено использовать в двухканальной (по вторичному воздуху) горелке отдельное регулирование скорости каждого из концентрических потоков вторичного воздуха. Это позволило обеспечить оптимальные условия для воспламенения топлива (внутренний поток воздуха) и оптимизировать смесеобразование и выгорание угольных частиц (внешний поток воздуха).

Для решения нетривиальной задачи организации в потоке для термического пиролиза топливных частиц было предложено сжигание высококонцентрированной аэросмеси, за счёт чего обеспечивалась предварительная термическая подготовка топлива в топочном объёме до смешения с воздухом. Необходимое смещение процессов прогрева и смесеобразования во времени было достигнуто за счёт сокращения расхода транспортирующего воздуха до 0,5-1,0% количества, необходимого для горения. Сброс сушильного агента в топку помимо горелок через сбросные окна, выполненные выше горелок, приводит к ступенчатому сжиганию, что также предопределяет сниженный выход NO_x . Опыт разработки, совершенствования и эксплуатации горелочных устройств для сжигания пыли высокой концентрации (ПВК) показал возможность снижения выхода оксидов азота в среднем на 20% и обеспечение устойчивости факела. Для котлов с жидким шлакоудалением сжигание ПВК

является наиболее приемлемым методом снижения NO_x, оно не связано со снижением температурного уровня процесса. Опыт сжигания на котле ТП-87 показал, что использование ПВК повышает температуру в надподовом пространстве на 150-200°С, при этом устойчивый сход жидкого шлака обеспечивается при нагрузках от 420 до 300 т/ч. По результатам этих разработок пылеугольные горелки для сжигания ПВК были установлены на большой группе ТЭС (котлы ТП-87 Ижевской ТЭЦ-2, ТП-87 Ивановской ТЭЦ-3, БКЗ-420 Петропавловской ТЭЦ-2, БКЗ-320 Омской ТЭЦ-4, ТП-80 ТЭЦ-14 Ленэнерго и др.). По поручению РАО «ЕЭС России» был разработан проект отраслевого методического документа по расчёту и проектированию горелочных устройств для ПВК.

Дальнейшее развитие эта технологии получила в результате разработки встроенных систем подогрева пыли. Была предложена предварительная термическая подготовка угля, которая заключается в нагреве угля в бескислородной среде до температуры 650-850°С. Разработанная ОРГРЭС встроенная система подогрева пыли (ВСП) являлась практической реализацией одного из направлений технологии термического облагораживания твёрдого топлива перед сжиганием. Она представляет собой ряд узлов подогрева, рассредоточенных по горелкам и вмонтированных в полость горелок (рис. 1).

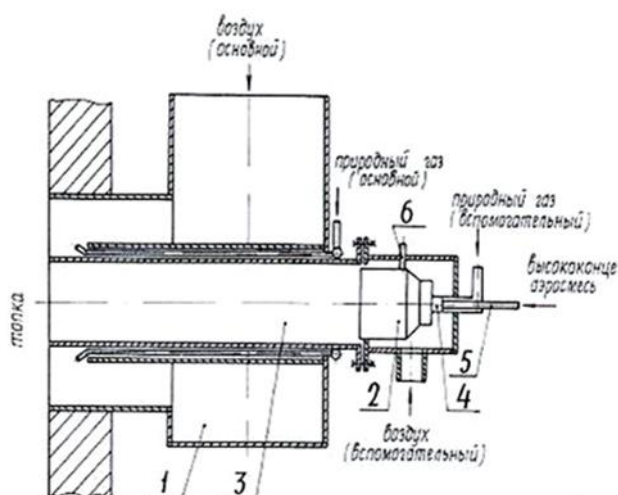


Рис. 1. Установка встроенного узла подогрева угольной пыли в полости пылегазовой горелки котла: 1 - штатная пылегазовая горелка котла; 2 - камера сжигания вспомогательного топлива; 3 - рабочий канал узла подогрева пыли; 4 - вспомогательная горелка; 5 - пылеподводящий патрубок; 6 - запальное устройство

Каждый узел подогрева состоит из камеры сжигания вспомогательного топлива и рабочего канала, в котором осуществляется подогрев и дегазация частиц угля. Использование высококонцентрированной аэрозольной смеси при минимальном расходе тепла на подогрев транспортирующего воздуха обеспечивает реализуемость конструкции ВСП. Система предварительного подогрева пыли кузнецкого угля была установлена на котле типа ТП-87 ИжТЭЦ-2. Расчётный расход угля на каждую горелку составляет 5,0 т/ч, расход вспомогательного топлива (природный газ) – 140-160 нм³/ч (до 3% по тепловыделению от расчётного расхода топлива на котёл).

Разработанная на кафедре муфельная растопочная пылеугольная горелка позволяет эффективно осуществлять растопку котлов с минимальными затратами мазута или природного газа за счёт газификации угольной пыли (см. рис. 2). Растопочная горелка состоит из следующих элементов: стального корпуса (1) с огнеупорной излучающей обмуровкой (2); патрубка подачи пылевоздушной смеси (3) со щелевым (вертикальная щель) устьем (4); двух одинаковых вспомогательных жидкотопливных или газовых низкорасходных горелок (5), размещённых симметрично относительно продольной оси щелевого устья патрубка (выходной части пылевой трубы); подвода вторичного воздуха (6).

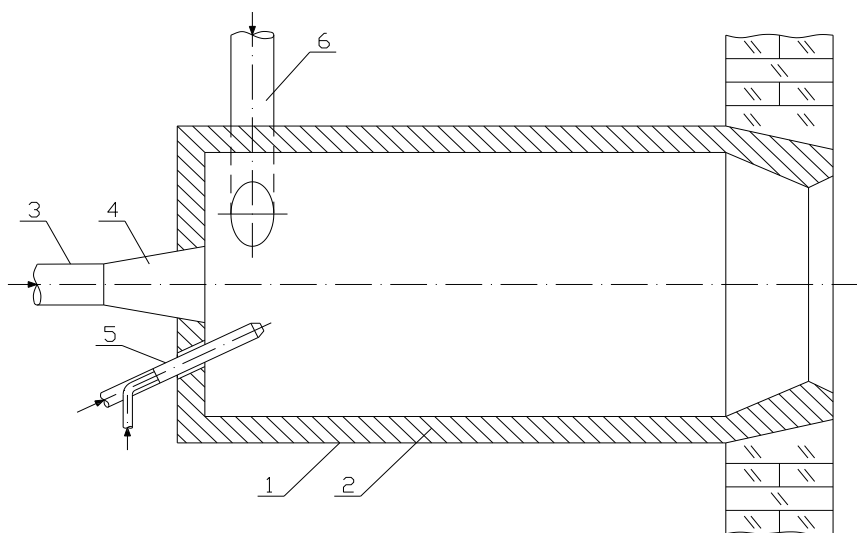


Рис. 2. Схема растопочной пылевоздушной горелки

Растопка горелки осуществляется следующим образом. Зажигаются две вспомогательные низкорасходные жидкотопливные или газовые горелки 5. Затем через патрубки 6 и 3 подаются воздух при $\alpha \approx 0,5$ и пылевоздушная смесь (угольная пыль с первичным воздухом), которая, выходя через щелевое устье 4, приобретает форму плоской струи, вытянутой по вертикали. Струя имеет развитую боковую поверхность и в начальный момент (до прогрева обмуровки) воспринимает излучением теплоту факелов вспомогательных жидкотопливных или газовых горелок одновременно с обеих сторон, что позволяет достаточно быстро осуществить предварительный нагрев пылевидного топлива.

После прогрева обмуровки до $600\text{--}700^\circ\text{C}$ вспомогательные жидкотопливные горелки отключаются; дальнейшие газификация, нагрев и воспламенение пылевидного топлива происходят за счёт излучения стенок обмуровки, нагрев которых, в свою очередь, поддерживается частичным сжиганием угольной пыли и образующихся горючих газов.

Горелка прошла испытания и проверена в эксплуатации на ТЭЦ-3 города Улан-Батора (Монголия). Горелка диаметром 0,8 и длиной 1 м была установлена на котле БКЗ-75. Две вспомогательные низкорасходные горелки по 30 кг/ч мазута разогревают огнеупорную кладку стенок муфеля горелки до 700°C за 30 минут, после чего идёт устойчивое воспламенение пылевоздушной струи за счёт излучения от футеровки муфеля без помощи вспомогательных низкорасходных горелок. До реконструкции растопка велась тремя мазутными форсунками производительностью 0,8–2 т/ч в течение четырёх часов. В результате реконструкции имело место уменьшение расхода растопочного мазута более чем в 100 раз.

Начиная с конца 90-х годов XX века в УрФУ ведутся инженерные работы по разработке методов слоевой бессмольной термохимической конверсии местных топлив – торфа, древесины, косточкового сырья и др. – и способов сжигания получаемого газа. Исследования проводились как на экспериментальных стендах, так и на опытно-промышленных установках. Исследовалось влияние влажности на скорость выхода летучих, изучался механизм прогрева крупнодисперсного топлива в шахте газогенератора, определялись среднеинтегральные удельные тепловые потоки через поверхность частицы, измерялся состав получаемого газа и его теплотворная способность и т.д.

Были проведены работы по получению газа ТХК в опытно-промышленном

газогенераторе на воздушном дутье. Был исследован однозонный газогенератор обращенного типа мощностью 200 кВт по топливу. Испытания проводились на полифракционных древесных отходах $W^p = 30-35\%$ (что больше значения $W^u = 10\%$ для древесины) средним эквивалентным диаметром от 30 мм до 150 мм. В результате испытаний был получен газ паровоздушной газификации с $Q_n^c = 7,6$ МДж/м³ при химическом КПД $\eta_x \approx 80\%$. Это позволило приблизиться при работе на древесине по химическому КПД к мощным поточным угольным установкам типа *Shell*, *Prenflo*, *Siemens*, являющимся основой современных газогенераторных технологий полигенерации.

Теоретически однозонный газогенератор обращенного процесса (рис. 3) – идеальный реактор для получения чистого (бессмольного) топливного газа для двигателя из натурального крупнокускового топлива. Однако на практике такой режим трудно осуществить в связи с наложением на процесс газификации противоречивых факторов. В результате было предложен подход с разбиением на ряд зон, в каждую из которых подаётся воздух с определённым расходом. На установке была опробована газификация древесного угля по трёхзонной схеме с окислением парогазов во встроенной камере сгорания.

В УрФУ создана универсальная газогенераторная установка мощностью до 15 кВт по топливу, предназначенная для проведения и сравнения различных схем газификации с разбиением процесса на ряд зон (рис. 4). Данный подход наиболее удобен при газификации мелкого пеллетированного древесного топлива, в слое которого конвективный перенос теплоты в швельшахту затруднён, в отличие от газификатора на крупнодисперсной древесине, где он является основным потоком тепла, прогревающим швельшахту. На установке реализована газификация с локальным разделением парогазовой и дисперсной фаз, окислением парогазов во встроенной камере сгорания и отводом части пиролизных газов и паров воды из верхней части реактора, отработаны устойчивые режимы получения генераторного газа с минимальным содержанием CO₂ (см. рис. 5).



Рис. 3. Газогенератор обращенного процесса



Рис. 4. Универсальная трехзонная газогенераторная установка

Общий расход воздуха 9 м³/ч распределялся в реакторе на три уровня. В результате образовалось три зоны горения с температурами не более 1000°C. Состав газа, %: CO $\approx 34-37$; H₂ $\approx 0-2,5$; CH₄ ≈ 0 ; CO₂ ≈ 0 ; O₂ ≈ 0 ; N₂ ≈ 60 ; теплотворная способность $Q_n^c \sim 4,3-4,9$ МДж/м³. При температуре в зонах горения, не превышающей 1000°C, получен газ, с минимальным содержанием промежуточных продуктов ТХК, сгорающий в некоптящем

факеле. По разработке получен патент РФ №66007.

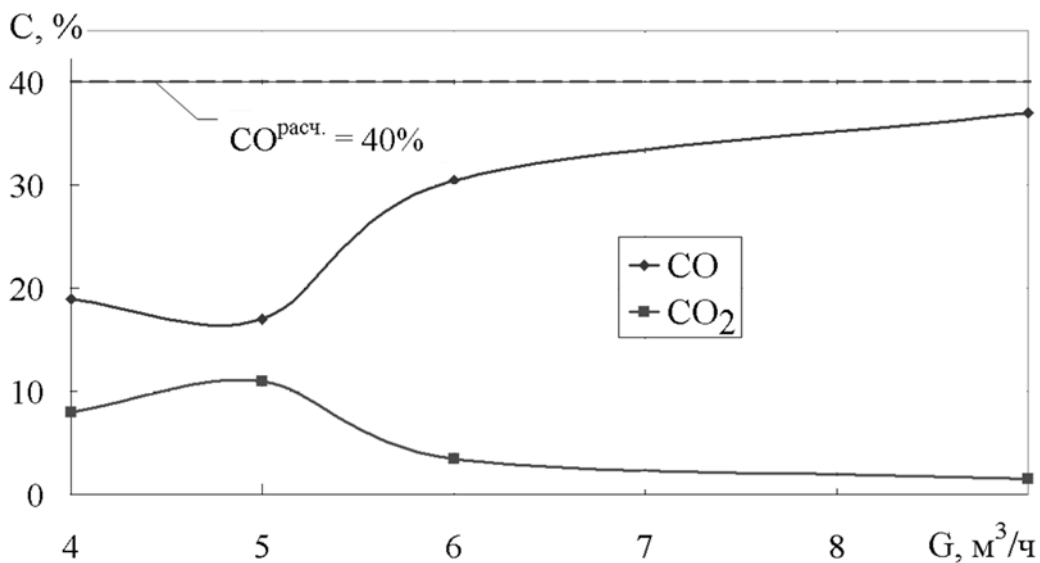


Рис. 5. Приближение концентрации CO в газе из древесины к «идеальному» значению при увеличении расхода воздуха

На одном из предприятий Свердловской области при участии УрФУ изготовлен и опробован в эксплуатации газификатор прямого процесса со средним отбором газа в составе отопительного дымогарного котла тепловой мощностью 90 кВт (рис. 6). Топливо – торф-полубрикет с влажностью $W^p < 16\%$, зольностью $A_s < 15\%$, размером 40x40x60 мм). Установка предназначена для отопления жилых домов и промышленных объектов. Отработаны режимы работы в диапазоне нагрузок от 20 до 90 кВт. Во всем диапазоне КПД агрегата составляет $85 \pm 5\%$, а температура уходящих газов не превышает 140°C .

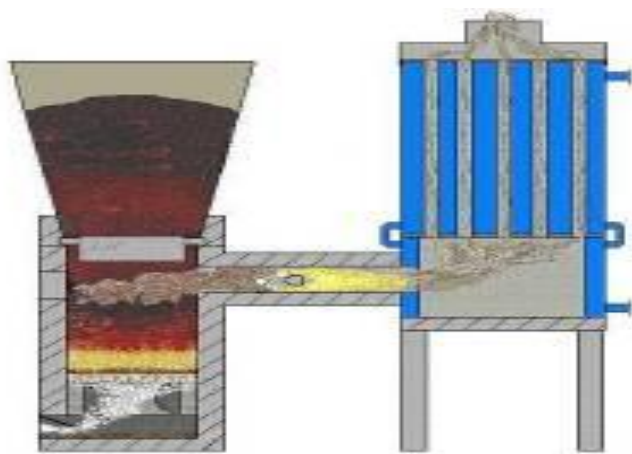


Рис. 6. Газогенераторный отопительный котёл

В слое при температуре $\sim 900^\circ\text{C}$ происходит горение и газификация торфа в бесшлаковочном режиме. Полученный генераторный газ выходит в муфель с температурой $360-400^\circ\text{C}$. Дожигание газа происходит в муфеле при температуре $900-1150^\circ\text{C}$. На установке

опробованы два способа подвода в муфель вторичного воздуха на сжигание газа: сосредоточенный и распределённый.

В муфель воздух подаётся распределено через вертикально вставленные перфорированные трубки. По результатам экспериментов можно сказать, что при разрежении в жаровой трубе 30–40 Па обеспечивается практически полное догорание горючих газов при суммарном избытке воздуха в установке ~ 1,2. Обычное же слоевое сжигание требует коэффициента расхода воздуха 1,4–1,5.

В зависимости от тепловой мощности установки её теплообменная часть может быть выполнена в двух вариантах:

- при мощности до 0,5 МВт – вертикальное исполнение (установки г. Твери, г. Шарьи и др.); в данном случае за счёт использования турбулизирующих вставок в дымогарные трубы котёл имеет улучшенные характеристики теплообмена (интенсивность выше в 1,15 раза), температура уходящих газов на 30-40°С ниже, чем для котла без вставок, и тепловой КПД составляет 85-90%;
- при большей мощности – горизонтальное исполнение котла (как в схеме Бионер); установка при осуществлении мероприятий по интенсификации теплообмена по газовой стороне менее материалоемка и более дешева (в 1,6 раза) в сравнении с аналогичными отечественными жаротрубными котлами и имеет тепловой КПД около 95%.

Давним партнёром кафедры тепловых электрических станций является ЗАО «СУЗМК ЭНЕРГО», имеющее уникальный для России опыт сотрудничества с чешскими компаниями: Институтом исследования топлив в Беховице и *ZVU Engineering*, занимающейся конструированием газогенераторного оборудования и курирующей газовый завод *Sokolovska Uhelna*, представляющий ныне газогенерирующую часть ПГУ *Vresova* мощностью 394 МВт. Концерн имеет реальный опыт в создании и эксплуатации крупных современных промышленных газогенераторов энергетического газа на углях, а также основного и вспомогательного котельного и иного энергетического оборудования. Предприятия концерна оказывают полный комплекс услуг от разработки проектной документации до пусконаладочных испытаний и постмонтажного сопровождения оборудования.

Вопросами газификации углей компания начала активно заниматься в 2002 г., когда к ним обратилось руководство АО «Алюминий Казахстана» с предложением рассмотреть вопрос перевода печей кальцинации (печей обжига гидрооксида алюминия) на генераторный газ с целью отказа от постоянно дорожающего лёгкого мазута марки М80-М100.

Основными критериями выбора технологии газификации являлись:

- теплота сгорания газа должна обеспечить необходимое тепловыделение при его горении для обеспечения успешного процесса кальцинации, т.е. минимальная теплота сгорания газа должна быть более 1500 ккал/нм³;
- топливом для газификации может рассматриваться только малозольный шубаркольский уголь используемый в технологии алюминиевого завода в печах спекания бокситов (учитывалось также, что использование одного и того же угля значительно снижает капитальные затраты на доставку и подготовку топлива);
- себестоимость генераторного газа должна быть такой, чтобы срок окупаемости строительства фабрики газификации угля не должен был превысить 7 лет.

Для подтверждения возможности газификации шубаркольского угля предприятием ЗАО «СУЗМК ЭНЕРГО» был изготовлен и смонтирован на одном из карьеров АО «Алюминия Казахстана» в Керегетасе газогенератор прямого процесса с диаметром реактора 2300 мм.

В 2003 году были произведены испытания слоевого атмосферного газогенератора. При этом часть генераторного газа сжигался в котле ДКВР-20, а часть выбрасывалась в

атмосферу. Паровоздушной газификации был подвергнут уголь шубаркольского месторождения. В ходе испытаний были исследованы различные режимы газификации. Подтверждена гибкость процесса и соответствие тепловых характеристик генераторного газа требуемым условиям. Таким образом, была выполнена основная цель исследований, по результатам которой было принято решение о строительстве газогенераторной станции на АО «Алюминий Казахстана».

Концепция производства синтетического газа основывалась на газогенераторах плотного слоя работающих под давлением. Для организации парокислородного дутья предполагалось использовать пар с ТЭЦ-1 и кислород 95%-ной чистоты от вновь возводимой кислородной установки. В виду сжатых сроков строительства было принято решение о покупке готовых основных узлов оборудования газификации. Партнером в разработке схемы газификации выступила чешская компания *ZVU Engineering*. Она же осуществила поставку реакторов и шлюзовых сосудов газогенераторов *Lurgi* типа *Mark-IV*. Компания *ZVU Engineering* имела длительный опыт конструирования подобного оборудования и тесные связи с газовым заводом *Sokolovska Uhelna*, эксплуатирующим слоевые газогенераторы.

Пробы проектного угля были направлены в Институт исследования топлив в Беховице (г. Прага). В ходе исследований были разработан режим парокислородной газификации угля и получены балансовые показатели процесса.

В 2005 году для одного из казахстанских инвесторов совместно с *ZVU Engineering* разработана технология производства полукокса мощностью 500 тыс. тонн в год. В 2006 году произведен запуск первого газогенератора на шубаркольском угле, первоначально на паровоздушном дутье. В 2006-2007 гг. произведены режимные испытания всех газогенераторов. Суточная производительность газогенераторной станции 960 тыс. нормальных кубометров.

Использование газа, получаемого газификацией твёрдых топлив, в агрегатах неприспособленных для прямого сжигания угля, является новым шагом в сторону ухода от энергетической зависимости предприятия ПАЗ. В процессе создания и пусконаладочных операций промышленной газогенераторной станции отработаны отдельные узлы, элементы конструкций, система АСУТП, инженерные сооружения, коммуникации и др., входящие в станцию подготовки газа.

С 2007 г. ведётся совместная работа специалистов ЗАО «СУЗМК ЭНЕРГО», ООО «НЭТ» и кафедры тепловых электрических станций УрФУ над разработкой конструкции промышленного газогенератора обращённого процесса с тремя зонами горения.