

УДК 662.743

DOI: 10.15372/ChUR2021332

## Исследование процессов переработки углей Тывы и Монголии с целью получения бездымного топлива

Ю. Д. КАМИНСКИЙ

*Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,  
Новосибирск (Россия)**E-mail: ydkaminskiy@yandex.ru*

### Аннотация

Рассмотрены свойства углей Тывы и Монголии с целью организации технологии их переработки для получения угольных бездымных брикетов, использование которых снизит образование смога и загрязнение воздуха от частных домов с угольным отоплением. Для проведения исследований по производству бездымного топлива разработаны и изготовлены опытно-промышленные установки термолиза. Получены топливные брикеты путем прессования твердых продуктов термолиза угля (полукокса) при повышенной температуре в периодическом режиме на гидравлических прессах в России и Монголии.

**Ключевые слова:** смог, уголь, термолиз углей, установки термолиза, бездымное топливо, топливные брикеты

### ВВЕДЕНИЕ

Проблемы образования смога и загрязнения воздуха от частных домов с угольным отоплением наблюдаются во многих регионах и городах Сибири (Красноярск, Минусинск, Омск, Новосибирск, Кемерово, Новокузнецк, Улан-Удэ и др.). В Красноярске и Минусинске более десяти тысяч частных домов с угольным отоплением. Они вносят существенный вклад в загрязнение приземного слоя атмосферного воздуха. В городе Кемерово, в силу слабой развитости газификации, особенно в районах перспективной застройки, более 30 тыс. домов частного сектора отапливаются углем. Здесь 14.2 % от основных выбросов в атмосферу – это вещества, выделяемые при сжигании угля в печах частных домов. В зимнее время, особенно в морозы, когда, как правило, бывают неблагоприятные метеосостояния, этот показатель доходит до 30 % и выше. По результатам исследований, в атмосферном воздухе Улан-Удэ наблюдались превышения предельных допустимых концентраций бензапирена в 7.6 раз, взвешенных веществ – в 1.7 раза, мелкодисперсной пыли – в 1.2 раза. Это указывает на значительное влияние автономных

источников отопления (частных домов с угольным отоплением) на состояние окружающей среды.

Особенно сложная экологическая обстановка, связанная с загрязнением воздуха от сжигания угля, наблюдается в столице Республики Тывы – городе Кызыл, и столице Монголии – городе Улан-Батор. По данным Всемирного банка, каждый год с октября по апрель 60 % загрязнения воздуха в Улан-Баторе приходится на долю жителей разрастающихся столичных районов, в которых расположено 180 тыс. юрт.

При нагревании угля в печи из него выделяются адсорбированная влага (при 100 °С), потом окклюдированные газы из микропор (при 200 °С), далее разлагаются органические вещества с образованием оксида углерода, паров воды и других компонентов (при 300 °С), а при температуре выше 400 °С происходит энергичное разложение угля с образованием жидких и газообразных продуктов, которые не успевают сгореть в печи и попадают в атмосферу, где конденсируются, образуя аэрозоль – дым.

Предлагаются различные варианты решения проблемы снижения выбросов при сжигании угля:

– использование специальных марок мало-дымных углей;

- оборудование юрт специальными утепляющими устройствами;
- переход на электроподогрев;
- применение усовершенствованных моделей печей;
- переход на использование бездымного топлива – топливных брикетов.

Малодымные угли гораздо дороже обычно используемых. Электроподогрев потребует колоссальных инфраструктурных решений и финансовых затрат. Препятствием на пути распространения усовершенствованных моделей печей является их высокая стоимость. Использование бездымного топлива возможно только при условии, если оно будет дешевле, чем уголь. Это может быть достигнуто в случае, когда выделенные из угля органические компоненты будут переработаны в товарную продукцию.

Сотрудники Института химии твердого тела и механохимии СО РАН (ИХТТМ СО РАН, Новосибирск), Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН (ТувИКОП СО РАН, Кызыл) и Института химии и химической технологии Монгольской академии наук (ИХХТ МАН, Улан-Батор) совместно приняли решение по исследованию процессов получения бездымного топлива именно из тех углей, которые на местах сжигает население. Были проведены комплексные исследования переработки каменных углей Каа-Хемского, Межегейского и Чаданского месторождений Тывы [1–5] и углей месторождений Монголии: бурого – Баганурского, каменного – Тавантолгойского [6, 7].

На углях Каа-Хемского и Чаданского месторождений изучалось влияние ультразвукового воздействия на процесс экстракции гексаном, этанолом, хлороформом и пиридином. Под действием ультразвука скорость экстракции повышается вдвое и при этом увеличивается выход битума из углей [7–10].

Изучение процессов, происходящих при нагреве углей, принципиально важно и представляет практический интерес. С этой целью были проведены термические исследования [11–17]. Общий характер поведения всех изученных проб при нагреве можно считать идентичным, но имеющим разную динамику. Угли начинают разлагаться по взрывному пути. Интенсивное характерное разложение всех проб углей начинается при температуре ~200–300 °С с незначительного окисления материала за счет поверхностного сорбированного кислорода, содержащегося в пробе. Далее процесс термоллиза

развивается последовательно в режиме образования жидкой и газовой фаз, с резким изменением скорости процесса в узком интервале температур (до 420–460 °С).

Было показано, что предварительная механическая активация углей изменяет их состав и свойства [11, 18–23]. При механоактивации происходят значительные фазовые преобразования с разложением материала и насыщением благодаря сорбции на его активной поверхности кислорода. В результате механической активации угля увеличивается его реакционная способность за счет образования новых и раскрытия недоступных пор, возникновения различных дефектов в структуре угля. Предварительная механическая активация углей приводит к понижению температуры начала плавления угля до 300–310 °С.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И ПРОДУКТОВ ТЕРМОЛИЗА УГЛЕЙ

Первоначально процессы термоллиза углей изучались при их термографических исследованиях. В последующем были созданы лабораторные установки термоллиза, на которых был организован отбор проб продуктов термоллиза для анализа [4, 12–17, 22–25].

Укрупненные опыты по термоллизу углей проводили на установке, созданной на базе лабораторной шахтной печи (рис. 1 и 2). Проба загружается в сетчатый стакан, который помещается в металлический цилиндр, устанавливаемый в шахтную печь. Цилиндр герметично через крышку соединяется с емкостью для сбора конденсата, которая вакуумируется при помощи вакуумного насоса. В крышку стакана устанавливается термомпара, которая регистрирует температуру навески.

При нагревании печи образующаяся жидкая фаза стекает на дно стакана, а возгоны перегоняются в конденсатор, где собираются в чашку.

Показано, что образующийся в результате термоллиза полукокс имеет внутреннюю структуру с развитой поверхностью. В газовую фазу при термоллизе угля разреза “Каа-Хемский” переходит более 50 % от массы угля. Состав газов представлен компонентами, имеющими молекулярную массу от 70 (*n*-петан) до 100 (*n*-гептан) г/моль.

Результаты анализа экстракта жидкого возгона пробы Баганурского бурого угля показали,

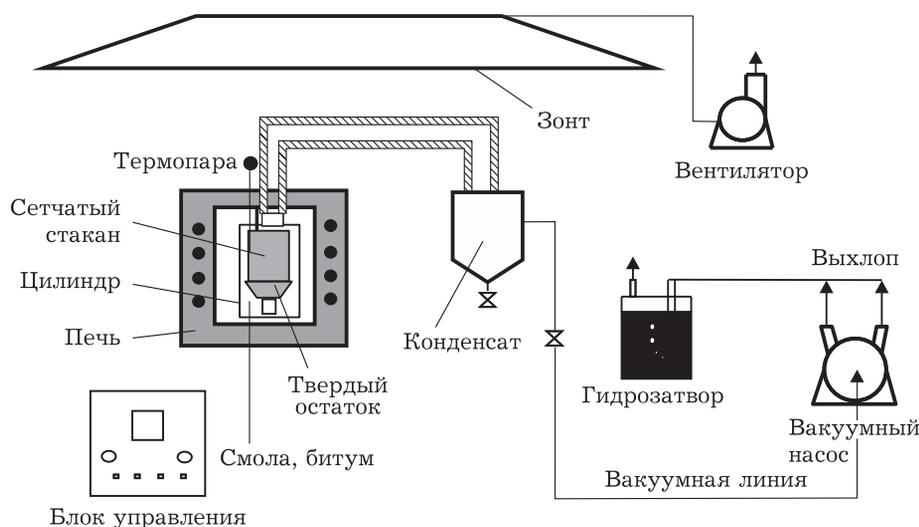


Рис. 1. Схема установки термолитиза углей в шахтной печи.



Рис. 2. Работа шахтной печи.



что основную массу экстрагированной органической вытяжки составляет фенол (60.26 %), в значительном количестве присутствуют 4-метилфенол (27.25 % массы экстракта) и 2-метилфенол (6.21 %). В экстракте также содержатся: 3-этилфенол – 2.69 %; 2,5-диметилфенол – 1.06 %; 1,2- и 1,3-диметил-2-циклопентены – 0.71 %, и ряд фаз в минимальном количестве.

Экстракт жидкого возгона пробы Тавантолгойского каменного угля содержит 93.13 % фенола и его производных (45.7 % – собственно фенола). Кроме этого, в нем содержится 1.04 % циклопентанона, 1.1 % циклогексанона, 0.67 % диэтилфталата, 0.48 % диметильного производного циклопентена и 0.57 % 2-метилхинолина.

Таким образом, анализ показал, что основными компонентами экстрактов исследуемых

бурых и каменных углей являются фенол и его производные.

Для извлечения органической составляющей жидких продуктов термолитиза образец был проэкстрагирован хлороформом. Методом хромато-масс-спектрометрии проанализирован индивидуальный состав углеводородов полученного экстракта. В продуктах термолитиза присутствуют фенол, по два изомера метил- и этилфенолов, *n*-алканы и  $\alpha$ -олефины. Методом масс-фрагментограмм установлено, что *n*-алканы представлены гомологическим рядом соединений с числом атомов углерода от 12 до 32. Непредельные углеводороды ( $\alpha$ -олефины) образуют гомологический ряд также состава  $C_{12}-C_{32}$ .

Этапы термолитиза углей месторождений Монголии представлены на схемах 1 и 2.

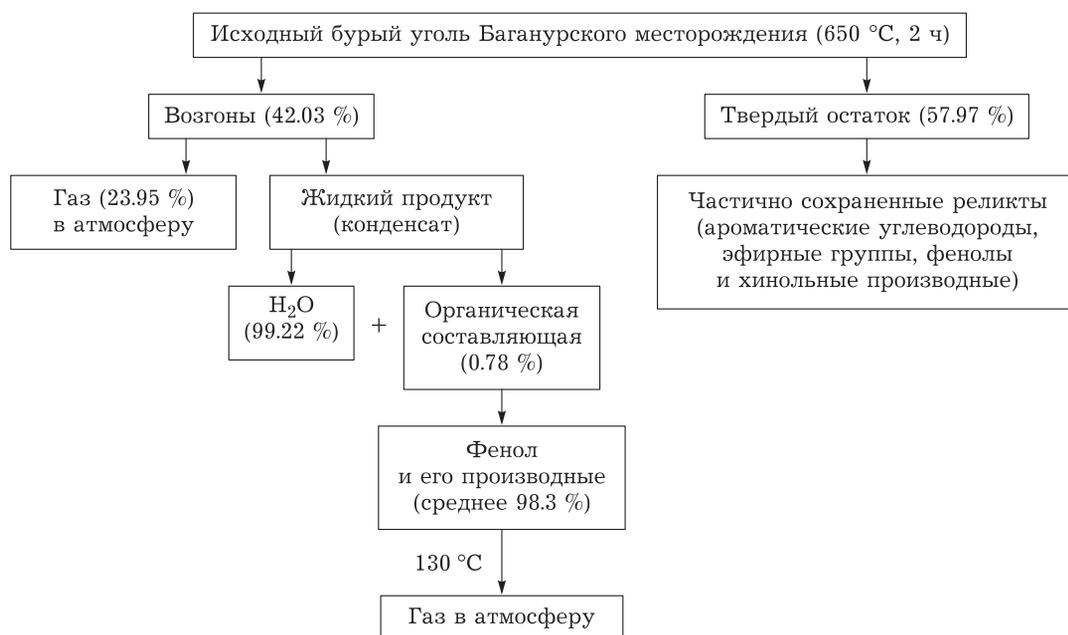


Схема 1.

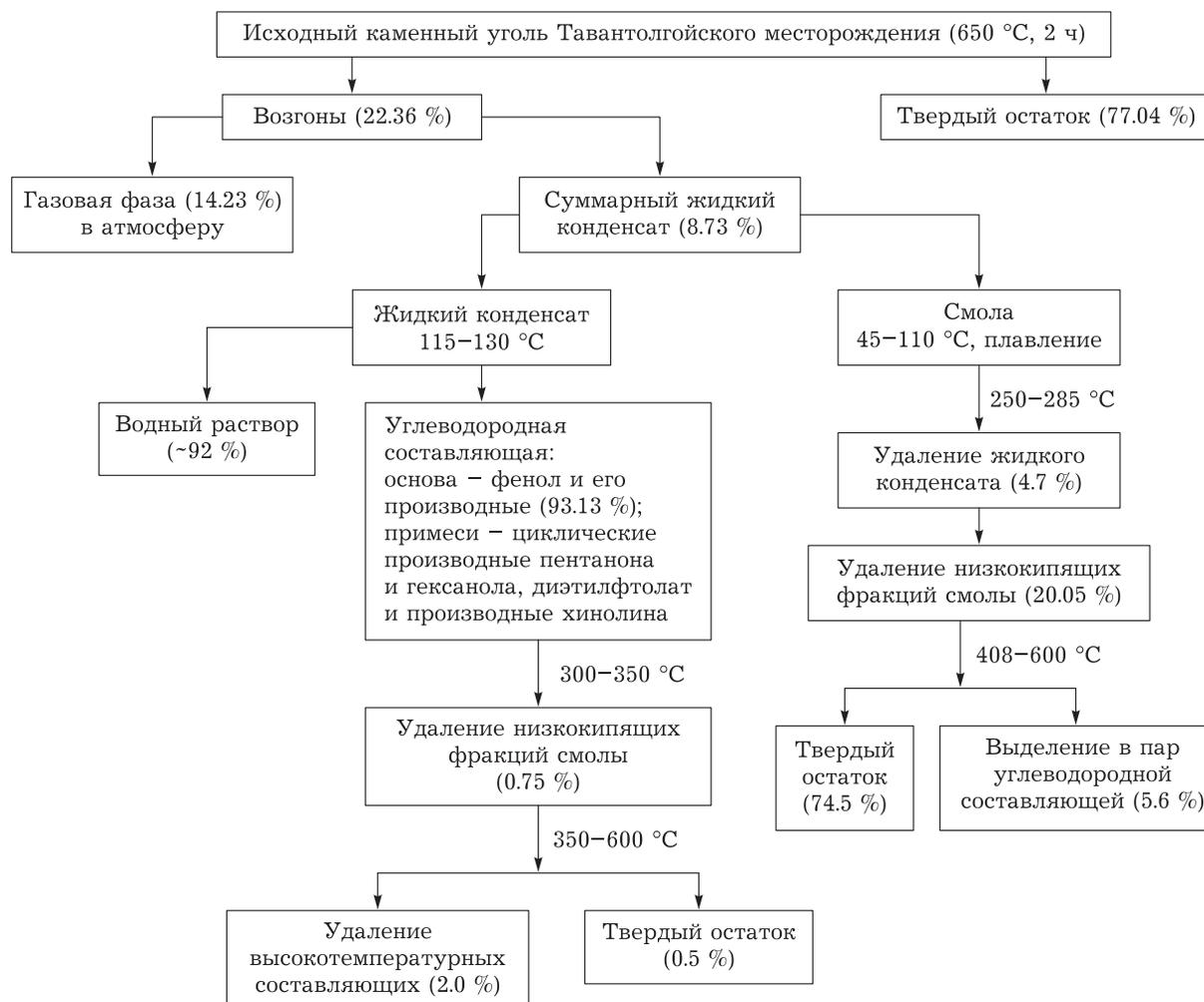


Схема 2.

### РАЗРАБОТКА УСТАНОВОК ДЛЯ ТЕРМОЛИЗА УГЛЕЙ И ПОЛУЧЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ БРИКЕТОВ

Для проведения исследований по получению бездымного топлива и оптимизации процесса переработки углей Тывы и Монголии разработана и изготовлена опытно-промышленная термолизная установка, предназначенная для проведения процессов термохимической обработки (ТХО) углей в непрерывном режиме (рис. 3 и 4).

Установка представляет собой шнек, помещенный в цилиндрический корпус и имеющий привод вращения. Внутри шнека вставлен нагреватель, обеспечивающий нагрев материала до заданной температуры. Вращение шнека обеспечивает движение материала от загрузочного патрубка к разгрузочному устройству. В цилиндрическом корпусе расположены патрубки для ввода газообразных реагентов и вывода газообразных и жидких продуктов. Для улавливания и очистки газообразных компонентов предусмотрена система газозудаления, состоящая из холодильника с емкостью, вакуумного насоса, абсорбера и линии обвязки с запорной арматурой.

Исходный материал загружается в приемный бункер. Материал за счет вращения шнека проходит три зоны. В первой зоне происходит

захват материала из приемного бункера и подача его в зону нагрева. В зоне нагрева производится нагрев материала до заданной температуры и выдержка для обеспечения прохождения физико-химических процессов. Образующиеся в процессе жидкие продукты, газы или пары удаляются из зон через штуцера с использованием вакуумной системы. После прохождения зоны нагрева материал поступает в зону выгрузки и ссыпается в разгрузочный патрубок.

Техническая реализация процессов получения топливных брикетов осуществлялась путем прессования твердых продуктов термолиза углей (полукокса) при повышенной температуре в периодическом режиме. Параллельно применялись гидравлические прессы в России и Монголии. На установке ПБГ-400 (рис. 5, а), разработанной в Институте горного дела СО РАН (ИГД СО РАН, Новосибирск), проводились исследования технических характеристик брикетов, отпрессованных из полукокса с установки ТХО [4, 26, 27].

Показано, что без добавки связующих при усилии прессования 400 кН брикеты получают непрочные. При использовании в качестве связующего водного раствора лигносульфоната в соотношении 1 : 20 к сухой массе компонентов смеси были получены топливные брикеты диаметром 50 мм и высотой 50 мм (см. рис. 5, б).

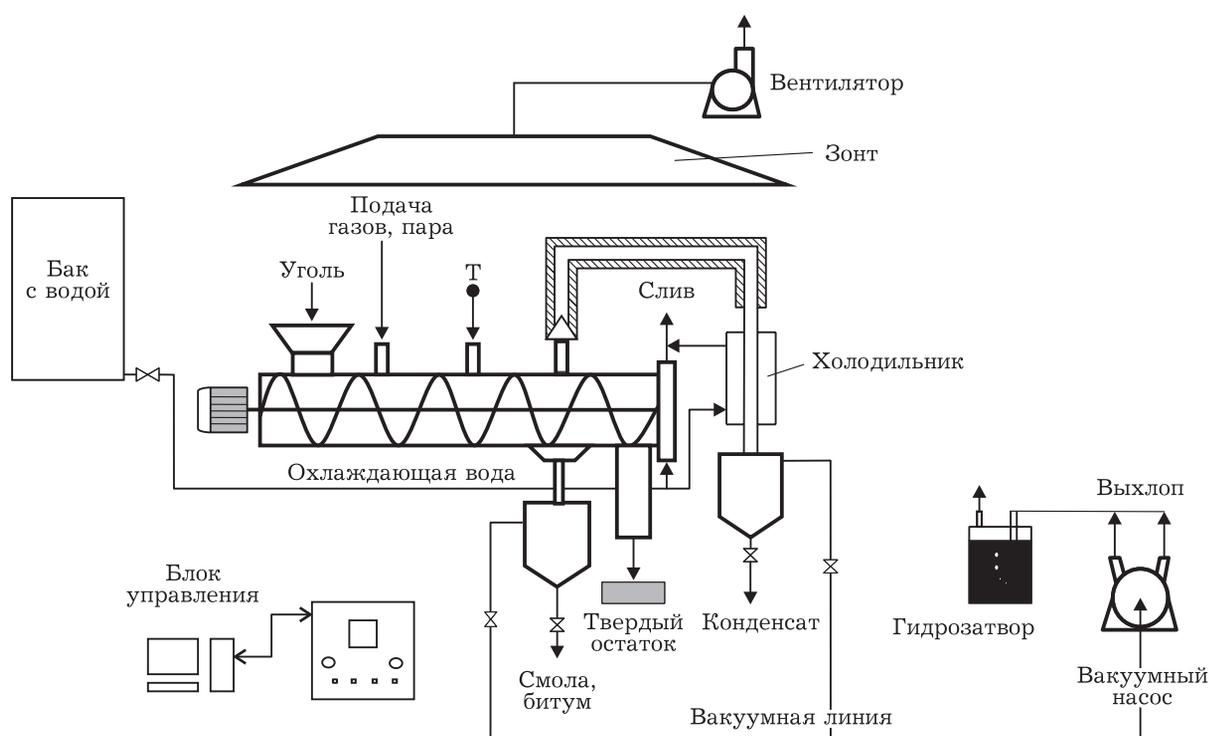


Рис. 3. Аппаратурно-технологическая схема установки термолиза углей.

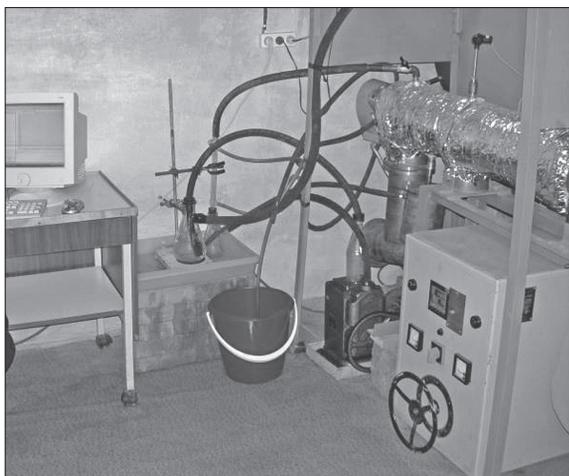


Рис. 4. Термолизная установка, работающая с вакуумным отбором жидкой и газовой фаз.

При оптимальной тепловой выдержке брикетной массы в пределах 180–360 с при температуре нагрева 150–250 °С, прочность на одноосное сжатие составляет 1.3–1.6 МПа. При естественной сушке брикетов в течение нескольких суток содержание влаги в брикетах стабилизируется и в дальнейшем не меняется. Прочность брикетов при длительном хранении остается практически постоянной.

В Монголии наши коллеги из ИХХТ МАН, работая на гидравлическом брикетном прессе (рис. 6), получили полукоксовые брикеты (со связующими) с характеристиками:

- зольность – 7.8–9.0 %;
- калорийность – 5923–5982 ккал/кг;
- механическая прочность – 127–153 кг/см<sup>2</sup>.



Рис. 5. Гидравлический брикетный пресс ПБГ- 400 (Россия) (а) и внешний вид полученных брикетов (б).



Рис. 6. Гидравлический брикетный пресс (ИХХТ МАН, Монголия) (а) и внешний вид угольных брикетов, полученных на нем (б).

### ТЕРМОЭКСТРУЗИВНАЯ УСТАНОВКА ОБРАБОТКИ УГЛЕЙ ШНЕКОВОГО ТИПА

Для изучения процессов получения бездымных топливных брикетов из угля в динамических условиях в ИХТТМ СО РАН изготовлена опытно-промышленная термоэкструзивная установка (ТЭУ-2), предназначенная для проведения термохимической обработки углей в непрерывном режиме (рис. 7).

Данная установка состоит из двух блоков: термолизного и термоэкструзионного. Термолизный блок представляет собой корпус (1) с расположенным в нем шнеком (2) с полым валом, в котором располагается электрическая печь сопротивления (3). Через нее возможен нагрев материала до 850 °С. Также первый блок включает узлы загрузки (4) и выгрузки материала (5), патрубки для подвода реагентов и отвода образующихся газов (6) и жидкостей (смол).

Второй блок (термоэкструзионный) состоит из корпуса (9) с расположенным в нем шнеком (10), который разделен на подающую и дозирующую части. Этот блок также оснащен за-

грузочной горловиной (11) и фильерой (12). Для поддержания заданной температуры материала блок экструзии имеет наружную электрическую печь сопротивления (13).

Оба блока установки приводятся в движение электродвигателями (14). Непрерывное измерение температуры установки осуществляется через термопреобразователи (15).

Для охлаждения блоков используется техническая вода, поступающая из бака (18). Для удаления газов установка ТЭУ-2 оборудована зонтом (19) с вентилятором (20).

Корпус и детали термолизного блока выполнены из жаропрочной, высоколегированной стали марки 20Х23Н18, а термоэкструдерный блок – из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Корпуса термолизного и экструзивного блоков установки теплоизолированы. Контроль за работой установки осуществляется через блок управления, включающий щит управления (21) и персональный компьютер (22).

На рис. 8 представлена установка ТЭУ-2 при проведении технологических испытаний про-

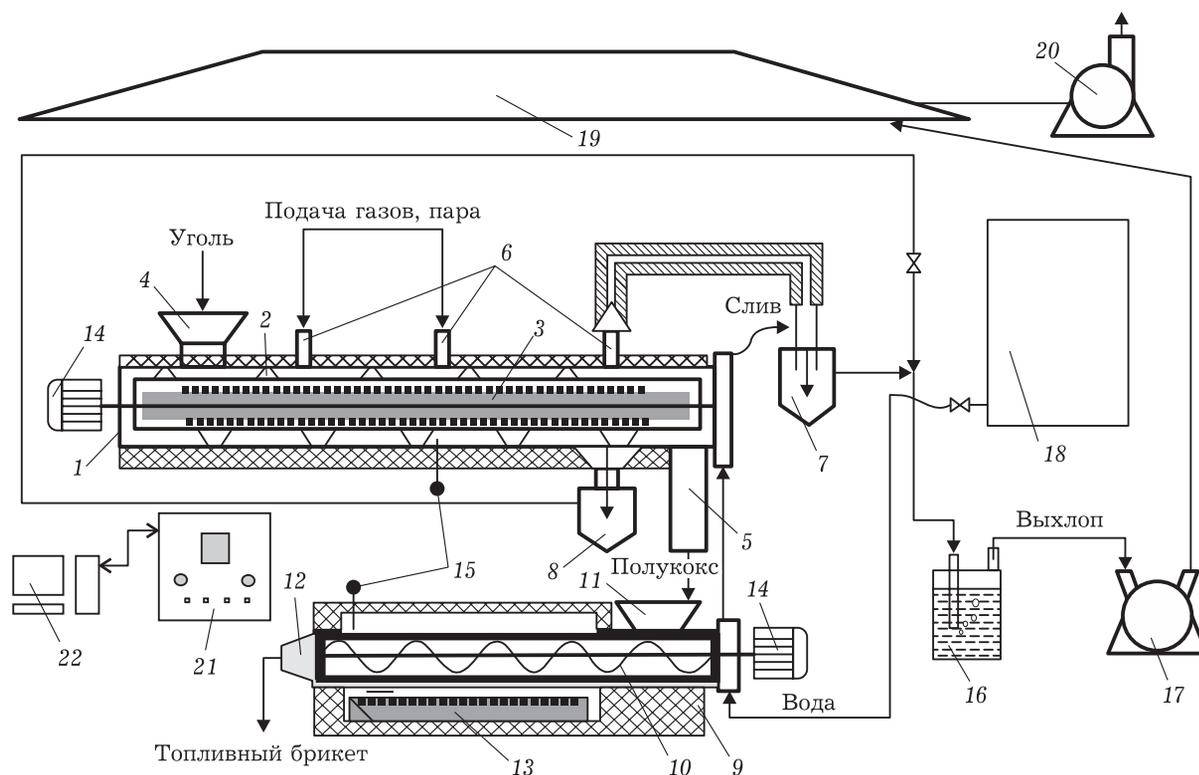


Рис. 7. Аппаратурная схема установки ТЭУ-2: 1 – корпус термолизного блока; 2 – шнек; 3 – электрическая печь сопротивления; 4 – приемный бункер; 5 – разгрузочный патрубок; 6 – патрубок для подачи и отвода газов; 7 – сборник конденсата; 8 – сборник жидких продуктов; 9 – корпус термоэкструдера; 10 – шнек; 11 – загрузочная горловина; 12 – экструдерная головка; 13 – электропечь сопротивления; 14 – электродвигатели; 15 – термопреобразователи; 16 – гидрозатвор; 17 – вакуумный насос; 18 – бак с холодной водой; 19 – зонт; 20 – вентилятор; 21 – щит управления; 22 – компьютер.



Рис. 8. Установка ТЭУ-2 (ИХТТМ СО РАН, Россия).

цессов получения бездымных топливных брикетов в ИХТТМ СО РАН.

К сожалению, из-за отсутствия финансирования работы по сквозному получению угольных брикетов в непрерывном режиме и их испытания были приостановлены.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные, полученные в результате описанных выше научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, позволяют предложить способ реального снижения выбросов из частных домов за счет замены углей на угольные топливные брикеты. Для этого необходимо:

- установить в районах с большим скоплением частного сектора мобильные или стационарные установки для термолиза углей и приготовления из полученного полукокса бездымных брикетов;
- осуществлять нагрев углей при термолизе за счет сжигания неконденсируемых газов, выделяемых при проведении процесса термолиза;
- использовать для термолиза некондиционную мелкую фракцию местных углей, поскольку она имеет меньшую стоимость по сравнению с кусковым углем при соизмеримом качестве полукокса;
- организовать централизованную переработку жидких продуктов с каждой установки;

– продавать угольные топливные брикеты по более низкой цене, чем стоимость угля на местном рынке. Скорее всего, для реализации этого потребуется финансовая поддержка. На первом этапе она могла быть организована за счет местных бюджетов, так как установки термолиза и брикетирования будут обеспечивать топливом только население ближних районов.

Такая организация работ не потребует больших финансовых затрат и в короткие сроки обеспечит снижение экологической нагрузки от сжигания углей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Куликова М. П., Лебедев В. И., Каминский Ю. Д. Направления глубокой комплексной переработки каменных углей Тувы // Докл. IV Всерос. науч.-практ. конф. «Региональные проблемы устойчивого развития природоресурсных регионов и пути их решения», Кемерово, 14–15 окт. 2003. С. 56–57.
- 2 Куликова М. П., Лебедев В. И., Каминский Ю. Д., Котельников В. И. Энергохимическая переработка каменных углей Тувы – основа устойчивого развития республики // Химия уст. разв. 2004. Т. 12, № 5. С. 541–554.
- 3 Куликова М. П., Котельников В. И., Соян М. К., Каминский Ю. Д. Перспективы развития угольной отрасли Республики Тыва / Материалы Всерос. науч.-техн. конф. «Новые технологии добычи и переработки природного сырья в условиях экологических ограничений», Улан-Удэ, 2004, С. 106–109.

- 4 Создание технологий и оборудования высокоэффективной экологически безопасной переработки минерального сырья и техногенных отходов (на примере объектов горнопромышленных агломераций Тувы и сопредельных регионов): сводный отчет по конкурсному проекту СО РАН № 28.4.8 (2004–2006 гг.) / отв. ред. В. И. Лебедев, науч. ред. Ю. Д. Каминский. Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2006. 116 с.
- 5 Куликова М. П., Каминский Ю. Д. Угли Тувы и направления их энергохимической переработки / *Материалы 8 Междунар. конф. “Природные условия, история и культура Западной Монголии и сопредельных регионов”, Горно-Алтайск, 19–23 сент. 2007. С. 266–270.*
- 6 Каминский Ю. Д., Копылов Н. И., Дугаржав Ж., Шоева Т. Е., Авид Б., Томорчулуун Б. Багануур, Тавантолгойн ордын нүүрсний хими – бүтцийн төрх байдал, онцлог // *Proceedings of the Mongolian Academy of Sciences. 2012. Vol. 52, No. 3 (203). P. 13–18. (In Mongol).*
- 7 Каминский Ю. Д., Дугаржав Ж., Шоева Т. Е., Авид Б., Томорчулуун Б. Багануур, Тавантолгойн ордын нүүрсний хими – бүтцийн төрх байдал, онцлог / Дугаржав Ж. Бүтээлийн дээжис. Уланбаатар: “СЭЛЭНГЭПРЕСС”, 2013. P. 24–31. (In Mongol).
- 8 Куликова М. П., Каминский Ю. Д. Влияние ультразвука на экстракцию каменного угля Каа-Хемского и Чаданского месторождений // *Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов центральной Азии / Под ред. В. И. Лебедева. Кызыл: Изд-во ТувИКОПР СО РАН, Вып. 10, 2007. С. 23–28.*
- 9 Куликова М. П., Каминский Ю. Д. Влияние ультразвукового воздействия на переработку угля / *Материалы Всерос. научных чтений с междунар. участием, Улан-Удэ, 25–29 июня 2007. С. 195–197.*
- 10 Куликова М. П., Каминский Ю. Д. Изменение свойств каменного угля Каа-Хемского и Чаданского месторождений при ультразвуковом воздействии / *Рос. науч. конф. (с междунар. участием) “Глубокая переработка углей – перспективы углехимической науки в России”, Звенигород, 21–23 ноября 2007. С. 110–111.*
- 11 Каминский Ю. Д., Копылов Н. И., Куликова М. П., Каминская Н. А. Влияние механической активации на свойства каменного угля Каа-Хемского и Чаданского месторождений // *Науч. труды ТувИКОПР СО РАН, Вып. 8, Кызыл, 2005. С. 123–128.*
- 12 Копылов Н. И., Каминский Ю. Д., Куликова М. П. Пиролиз угля Тувинского месторождения // *Химическая технология. 2008. Т. 9, № 4. С. 168–172.*
- 13 Каминский Ю. Д., Копылов Н. И., Дугаржав Ж., Шоева Т. Е., Авид Б. Багануур, Тавантолгойн нүүрсний термографи, термолизийн судалгаа // *Proceedings of the Mongolian Academy of Sciences. 2012. Vol. 52. No. 3 (203). P. 5–12. (In Mongol).*
- 14 Каминский Ю. Д., Дугаржав Ж., Шоева Т. Е., Авид Б. Багануур, Тавантолгойн нүүрсний термографи, термолизийн судалгаа / Дугаржав Ж. Бүтээлийн дээжис. Уланбаатар: “СЭЛЭНГЭПРЕСС”, 2013. P. 32–42. (In Mongol).
- 15 Копылов Н. И., Каминский Ю. Д. Термическое разложение углей Тувинского месторождения // *Химия уст. разв. 2013. Т. 23, № 3. С. 319–327.*
- 16 Копылов Н. И., Каминский Ю. Д., Дугаржав Ж., Авид Б. Термолиз бурого угля Баганурского месторождения (Монголия) // *Химия уст. разв. 2013. Т. 21, № 5. С. 499–504.*
- 17 Копылов Н. И., Каминский Ю. Д., Дугаржав Ж., Авид Б. Динамика термического разложения каменных углей Тавантолгойского месторождения Монголии // *Химия уст. разв. 2014. Т. 22, № 1. С. 101–106.*
- 18 Копылов Н. И., Куликова М. П., Каминский Ю. Д. Изменение свойств каменных углей Каа-Хемского и Чаданского месторождений в процессе механической активации // *Материалы Междунар. научно-практ. конф. “Химия – 21 век. Новые технологии, новые продукты”, Кемерово, 10–12 мая 2005. С. 363–366.*
- 19 Kulikova M. P., Kaminskii Y. D. Influence of mechanical activation and alkylation on extractability of coal / *VI Int. Conf. on Mechanochemistry and Mechanical Alloying, Jamshedpur, India, December 1–4, 2008, P. 14.*
- 20 Kulikova M. P., Kaminsky Yu. D. Influence of mechanical activation on the properties of coal // *III Int. Conf. “Fundamental Bases of Mechanochemical Technologies”, Novosibirsk, May 27–30 2009, P. 213.*
- 21 Куликова М. П., Каминский Ю. Д. Влияние механической активации на процессы переработки каменного угля Улуг-Хемского бассейна / *VII Всерос. конф. (с междунар. участием) “Горение твердого топлива”, Новосибирск, 10–13 ноября 2009. С. 78–82.*
- 22 Копылов Н. И., Каминский Ю. Д., Дугаржав Ж., Авид Б. Исследование влияния предварительной механической и механохимической активационной обработки материала на термолиз углей Тавантолгойского месторождения (Монголия) // *Химия уст. разв. 2013. Т. 21, № 5. С. 493–497.*
- 23 Kopylov N. I., Kaminsky Yu. D., Dugarjav J., Avid B. Influence of mechanical activation on coal thermolysis // *IV Int. Conf. “Fundamental Bases of Mechanochemical Technologies”, Novosibirsk, June 25–28, 2013. P. 56.*
- 24 Копылов Н. И., Каминский Ю. Д., Дугаржав Ж., Авид Б., Патрушев Ю. В. Продукты термолиза баганурского бурого угля (Монголия) // *Химия уст. разв. 2015. Т. 23, № 1. С. 39–47.*
- 25 Копылов Н. И., Каминский Ю. Д., Дугаржав Ж., Авид Б., Головкин А. К., Патрушев Ю. В. Продукты термолиза тавантолгойского каменного угля // *Химия уст. разв. 2015. Т. 23, № 3. С. 235–246.*
- 26 Каминский Ю. Д., Дугаржав Ж. Производство и испытание бездымного топлива // *Матер. Междунар. науч.-практ. конф. “Сотрудничество СО РАН с Академией наук Монголии в рамках реализации совместных проектов: итоги и перспективы”, Иркутск, 14–16 февр. 2012. С. 27.*
- 27 Каминский Ю. Д., Дугаржав Ж. Производство и испытание бездымного топлива // *Материалы научно-практической конференции по результатам конкурса совместных Российско-Монгольских научных проектов, Улан Батор, 18–20 ноября 2013. С. 4–13.*