

Коллектив представляет комплексную научно-исследовательскую и практическую работу по созданию **научно обоснованных инновационных технических решений, существенно повысивших экологическую безопасность, эффективность и экономичность теплоэнергетических технологий, основанных на прямом сжигании и пиролизе композиционных топлив из низкосортного сырья, промышленных и коммунальных отходов, внедренных на предприятиях топливно-энергетического комплекса и энергетического машиностроения**, в научно-исследовательских институтах и организациях высшего образования на территории Российской Федерации.

Создана общая теория малоэмиссионной термической конверсии низкосортных топлив и промышленных отходов, **предложены новые технологические решения и установки** для ее переноса в реальный сектор экономики. Проведены **испытания созданных технологических решений на энергетических объектах** разной производительности и назначения. Получен **опыт внедрения результатов в топливно-энергетический сектор Томской и Кемеровской областей, Красноярского края, Республики Татарстан и др.**

Решенные задачи, положенные в основу номинированной работы, полностью соответствует **Стратегии научно-технического развития науки в Российской Федерации** по направлениям: **Н1** – Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта; **Н2** – Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии; **Н5** – противодействие техногенным, биогенным, социокультурным угрозам, терроризму и идеологическому экстремизму, а также киберугрозам и иным источникам опасности для общества, экономики и государства.

Исследования, положенные в основу выдвигаемой работы, проведены коллективом в период с 2013 по 2022 гг. Основные результаты НИР представлены

**в 147 научных работах**, опубликованных в зарубежных научных изданиях, а также в ведущих отечественных научных изданиях. **Из них в международных журналах 1 и 2 квартилей Web of Science – 95, российских журналах из перечня ВАК – 34.** В течение 2013–2022 гг. подготовлены и опубликованы в издательстве СО РАН 4 монографии («Зажигание органоводоугольных топливных композиций», «Испарение и трансформация капель и больших массивов жидкости при движении через высокотемпературные газы», «Гелеобразные топлива: приготовление, реология, распыление, горение», «Коагуляция, дробление и фрагментация капель жидкостей в многофазных и многокомпонентных газопарокапельных средах»), в которых приведены все основные результаты НИР. На созданные программно-аппаратные технологические решения получены **патенты (в количестве 5) и свидетельства на программы для ЭВМ (в количестве 25).** Членами коллектива и под их научным руководством в период с 2013 по 2022 гг. **защищены 16 кандидатских и докторская диссертации.**

Научные результаты, представленные в выдвигаемой работе, получили широкое признание отечественной и международной научной общественности, активно цитируются в международной и отечественной научной печати. По тематике исследований, представленных в выдвигаемой работе, члены авторского коллектива являются руководителями и исполнителями группы **крупных научных проектов:** Российский научный фонд – 5 шт., Российский фонд фундаментальных исследований – 3 шт., Совет по грантам Президента РФ – 5 шт., Программа Приоритет-2030 – 2 шт., Государственные задания – 3 шт. Реализованы **крупные проекты в интересах индустриальных партнеров с ПАО «Татнефть» и ФГБУН Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе СО РАН.**

Авторским коллективом выполнены экспериментальные и теоретические исследования, обосновывающие возможность приготовления и **эффективной термической конверсии** композиционных жидких топлив на основе

отработанных масел, древесных отходов, фусов, смол, полимеров, нефтяных отложений и шлама, низкосортных углей, водонефтяных эмульсий.

Разработана **технология и пилотная установка для термической утилизации смесей из промышленных и коммунальных отходов** (рис. 1).



**Рис. 1.** Пилотный стенд для воспроизведения условий, соответствующих энергетическим установкам для термической конверсии сырья

Установка позволяет реализовывать полный цикл переработки сырья – от подготовки до получения тепловой энергии. Результаты экспериментальных исследований и полевых испытаний подтверждают, что сжигание композиционных жидких топлив на основе промышленных и коммунальных отходов в качестве основного энергоресурса на теплоэнергетических объектах позволяет значительно снизить угрозу антропогенного загрязнения. Энергетическое применение композиционных жидких топлив в условиях типичных топок паровых котлов характеризуется **снижением концентраций  $\text{NO}_x$  в 1,6–1,8** раза; **снижением концентраций  $\text{SO}_2$  в 2,0–2,7** раза; **снижением концентраций оксидов углерода в 1,5** раза по сравнению с угольным топливом.

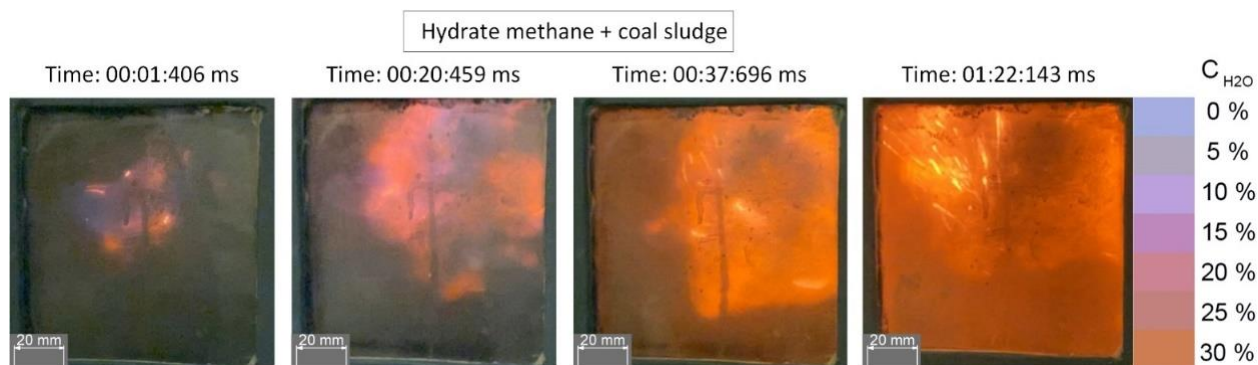
Разработанная авторским коллективом технология сжигания отходов в составе композиционных жидких топлив на основе промышленных и коммунальных отходов для производства тепловой и электрической энергии предназначена для внедрения на местных тепловых электрических станциях в регионах с большим объемом накопленных промышленных отходов, например, в местах с развитым сырьевым сектором экономики за счет добычи и экспорта угля. В результате замены исчерпаемого традиционного топлива (уголь, мазут)

эквивалентным по энерговыделению количеством композиционного жидкого топлива себестоимость 1 Гкал производимой энергии снизится на **30–70 %** (в зависимости от состава), что соответствует прибыли не менее **200 руб./Гкал** (при тарифе 1750 руб./Гкал). Потенциальное увеличение ВВП от реализации предложенной стратегии энергогенерации в масштабах Российской Федерации за счет замещения высококачественных углеводородных топлив на композиционные жидкие топлива из промышленных и коммунальных отходов и более эффективного применения высвободившихся объемов высококачественных первичных углеводородов (около **1 млрд. тонн** ежегодно), например, на нужды металлургической и нефтехимической промышленности составит около **300 млрд. руб./год**.

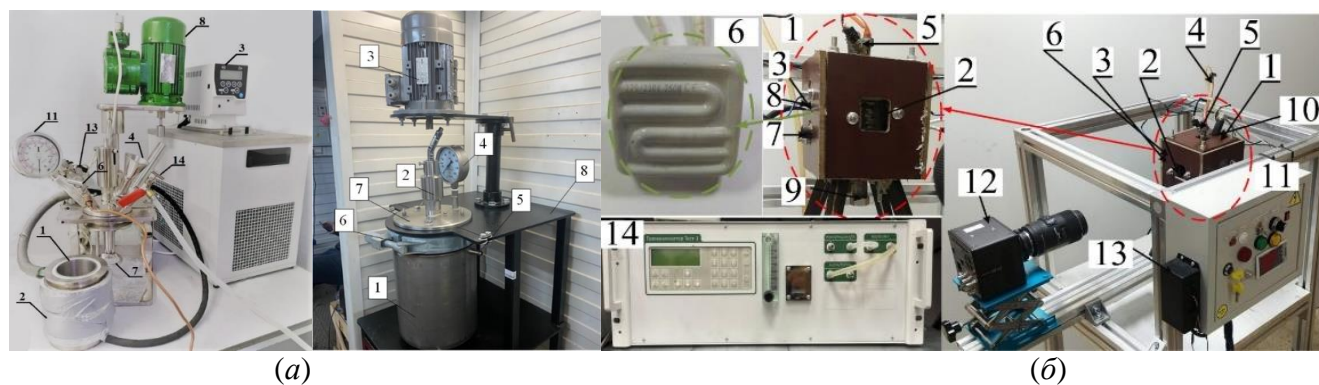
Авторским коллективом выполнено технико-экономическое обоснование экономической и экологической целесообразности перехода объектов энергетики с традиционного топлива на совместный цикл газификации и сжигания топлив на основе низкосортных углеводородов, промышленных и коммунальных отходов. Экспериментально подтверждено, что применение нескольких компонентов в составе смесевых топлив в условиях смешанного теплообмена инициирует реализацию **синергетических эффектов**, увеличивающих общую эффективность процесса термического разложения, газификации и пиролиза. Получена **не имеющая аналогов база данных** с основными технико-экономическими, теплофизическими и экологическими характеристиками смесевых, композиционных и альтернативных топлив.

Разработаны **уникальные технологии синтеза газовых гидратов и их совместного сжигания с низкосортными топливами**. Экспериментально обосновано повышение эффективности термической конверсии промышленных отходов при использовании гидрата метана или природного газа, обусловленных ускорением зажигания и снижением газовых антропогенных выбросов (рис. 2). Установлено, что при синтезе кристаллов гидрата необходимо применять механические воздействия в виде перемешивания жидкости и кристаллов в реакторе (рис. 3). Предложенная технология позволяет **снизить затраты** на

собственные нужды работы реактора при росте кристаллов гидрата **на 10–15 %**, снизить время выхода метана практически в 100 раз, а также увеличить диапазон его максимальной концентрации в 10 раз.



**Рис. 2.** Видеокадры сжигания угольного шлама с гидратным газом



**Рис. 3.** Установки синтеза газогидратов (а) и стенд для совместного сжигания газового гидрата и топлива (б)

На основе полученных результатов экспериментальных исследований разработана концептуальная схема применения газогидратов метана и двуокиси углерода в нефтегазовой и энергетической промышленности, а также для локализации и ликвидации возгораний на таких предприятиях и в лесной полосе (рис. 4). Установлено, что использование такой схемы может позволить сэкономить **около миллиарда долларов**, а также получить побочные продукт в виде очищенной от примесей воды.

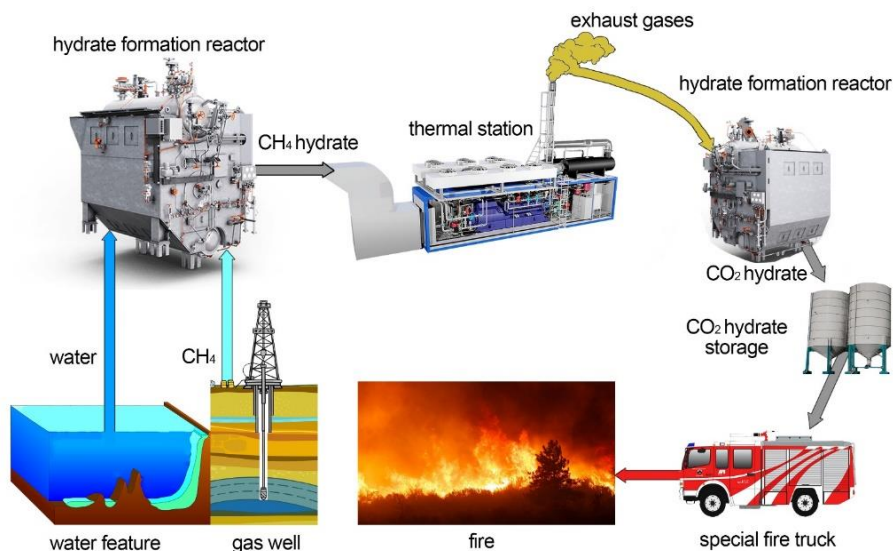


Рис. 4. Схема создания и использования газогидратов в промышленных технологиях.

**Впервые в России** были проведены **испытания** разработанного опытно-промышленного горнового газификатора (рис. 5) производительностью по топливу **4 т/ч**, в результате которых подтверждена работоспособность отдельных узлов и установки горновой газификации в целом.

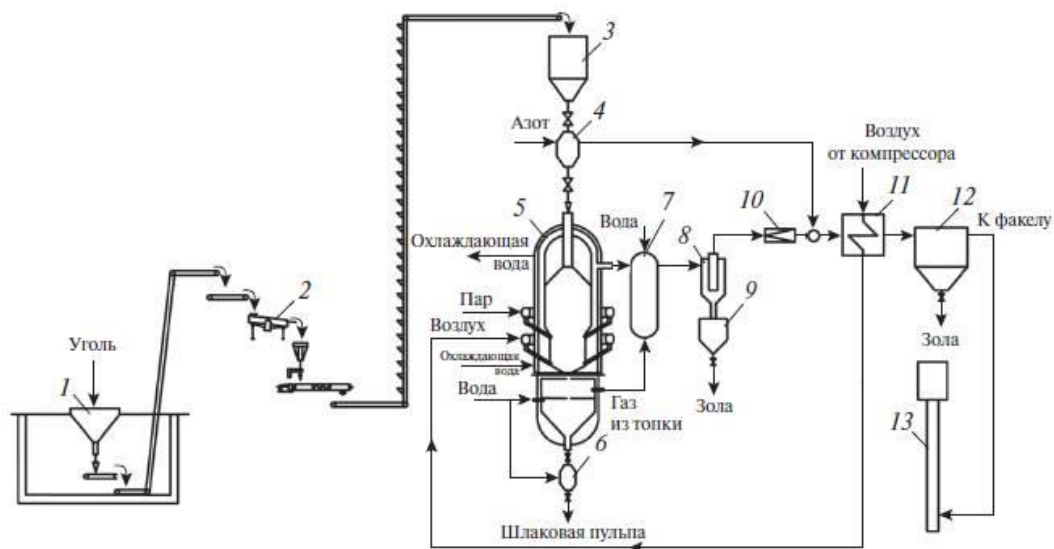


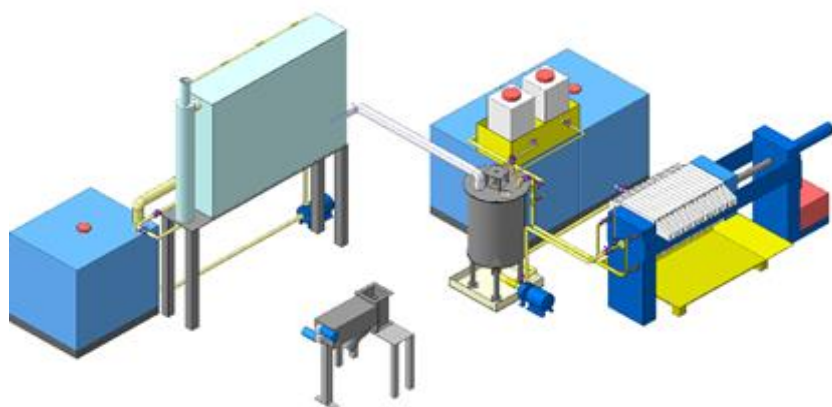
Рис. 5. Принципиальная схема опытно-промышленной установки горновой газификации твердого топлива

Опытно-промышленная установка по глубокой переработке твердого топлива на основе технологии горновой газификации была размещена на



территории действующей Томской ТЭЦ-3. Испытания установки проводились с использованием некондиционных углей, предоставленных компанией АО «СДС-Уголь». В результате проведения испытаний был получен синтез-газ с устойчивым составом ( $\text{CO}_2$  – 5,4 об. %,  $\text{CO}$  – 20,8 об. %,  $\text{CH}_4$  – 3,6 об. % и  $\text{H}_2$  – 7,3 об. %).

Впервые разработан и в дальнейшем опытно апробирован способ химического восстановления углеродного остатка пиролиза отработанных шин до показателей технического углерода (рис. 6). Достигнуто снижение зольности продукта с 17 до 2 мас. % и содержания серы с 2,5 до 0,5 мас. %. Продукт может быть повторно использован в качестве одной из компонент при производстве шин, что позволяет частично обеспечить замкнутость технологического процесса производства шин, а также снизить углеродный след за счет сокращения использования ископаемого сырья. Опытный образец углерода испытан в резинотехнических смесях на одном из предприятий компании ПАО «Татнефть», по результатам которых установлено, что при смешении данного углерода с техническим (марка N550) в соотношении углеродный остаток/технический углерод 20/80 мас. % не происходит существенных изменений рабочих характеристик резинотехнических изделий.



**Рис. 6.** Принципиальная схема и внешний вид опытной установки химического восстановления углеродного остатка пиролиза отработанных шин

Широкое применение разработанной технологии позволит ежегодно утилизировать **более 1000 тонн отработанных автомобильных шин в год** и освобождать **не менее 30 га площадей** полигонов. Потенциальный экономический эффект от применения технологии переработки отработанных шин с получением углеродного остатка на рынке Российской Федерации составляет **более 12 млн. руб./год.**

Разработана технология переработки низкосортных компонентов, отходов и биоресурсов с получением энергетически ценных продуктов (рис. 7).



**Рис. 7.** Альтернативные жидкие и композиционные топлива, полученные при переработке отходов индустрии, сельского хозяйства и пищевого сектора

Для объектов промышленной энергогенерации разработана **интеллектуальная информационная система контроля и анализа** взаимосвязанных технологических процессов на основе технологий «нейронных сетей» с возможностью разработки организационных профилактических и предупредительных мероприятий. Интеллектуальная система реализована в виде программного обеспечения для управления технологическими процессами синтеза и использования топливных композиций. Функционал интеллектуальной системы (рис. 8) включает алгоритмы выбора сырья, технологии и параметров получения композиционных топливных составов, их стабилизации, хранения, первичного распыления и вторичного измельчения, процессов горения, и улавливания газообразных выбросов.





**Рис. 8.** Схема применения нейросетевых алгоритмов для получения требуемого компонентного состава топлива из совокупности компонентов с учетом заложенных результатов мультикритериального анализа

Объемы внедрения малоэмиссионных энерготехнологий термической конверсии низкосортных топлив и промышленных отходов составили **более 100 млн. руб.** Достигнутый экономический эффект выражен в снижении себестоимости 1 Гкал производимой энергии на **30–70 %**. Достигнутый социальный эффект характеризуется ежегодным снижением на **20–30 %** площади территорий вновь организуемых полигонов для захоронения отходов, **сокращением до 20 % выбросов парниковых газов**, связанных со складированием промышленных и коммунальных отходов, и снижением концентраций антропогенных выбросов ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ) при выработке тепловой и электрической энергии в 1,6–2,7 раза.

Коллективом получены 5 актов и справок об использовании и внедрении результатов выполненных практико-ориентированных исследований от предприятий Томской и Кемеровской областей, Красноярского края, Республики Татарстан. Потенциальный совокупный экономический эффект от внедрения малоэмиссионных энерготехнологий составляет **более 325 млн. руб./год**. Все представленные результаты получены до 1 ноября 2022 года.