

## **РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВОК С ТВЁРДЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ**

**Я.А. Бирюков, В.В. Хасхачих**

*Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского  
Россия, Москва, yaroslav\_biryukov@list.ru, v.khaskhachikh@gmail.com*

*Аннотация.* Создана экспериментальная модель промышленной установки с твердым теплоносителем. Разработан дозатор сыпучего теплоносителя и получена зависимость производительности от различных факторов. Проведены пусконаладочные опыты, исправлены выявленные недостатки.

*Ключевые слова:* горючий сланец, термическая переработка, пиролиз, установка с твёрдым теплоносителем, синтетическая нефть, теплообмен.

## **DESIGN AND CREATION EXPERIMENTAL STAND FOR MODELING AND OPTIMIZATION OF SOLID HEAT CARRIER UNITS TECHNOLOGICAL PARAMETERS**

**Ya.A. Biryukov, V.V. Khaskhachikh**

*G.M. Krzhizhanovsky Power Engineering Institute,  
Russia, Moscow, yaroslav\_biryukov@list.ru, v.khaskhachikh@gmail.com*

*Summary.* The experimental model of industrial solid heat carrier unit was created. Bulk heat-transfer agent dispenser was designed and the dependence of performance on various factors was found. Initial experiments were performed, the identified problems are corrected.

*Key words:* oil-shale, thermal processing, pyrolysis, solid heat carrier units, synoil, heat and mass transfer.

Энергетическим институтом им. Г.М. Кржижановского (ЭНИИ) разработана и успешно эксплуатируется технология переработки твердых топлив – процесс «Галотер». Суть технологии заключается в термическом разложении органической части топлива без доступа кислорода (пиролизе) при его смешивании с нагретым твердым теплоносителем в реакторе барабанного типа. На данный момент эта технология считается лучшей и пока не превзойдённой технологией переработки мелкозернистого сланца.

Тем не менее, анализ технологических показателей процесса даёт основания говорить о возможности дальнейшего его совершенствования. Основным целевым продуктом технологии УТТ являются жидкие продукты (искусственная нефть). По многолетним статистическим данным выход жидких продуктов в существующей технологии УТТ составляет 12-13 % на исходную массу сланца, что составляет только ~ 55 % от потенциально возможного выхода смолы из данного топлива, определяемого по стандартным методикам в реторте Фишера. Такое различие можно объяснить следующими причинами: либо не обеспечиваются оптимальные температурные и временные условия прохождения процесса термического разложения по ходу технологического процесса, либо уже образовавшиеся жидкие продукты видоизменяются по ходу процесса (превращаются в газ, сорбируются полукоксом и т.д.) Т.е., выявив особенности поведения продуктов на разных участках преобразования исходного топлива в конечные продукты, можно будет определить и причины потерь полезной продукции.

С целью более глубокого изучения отдельных элементов технологического процесса и его совершенствования в ЭНИИ разработан и создан экспериментальный «горячий» стенд – модель установки УТТ (рис. 1), а также его отдельные «холодные» элементы (смеситель, реактор и т.д.).

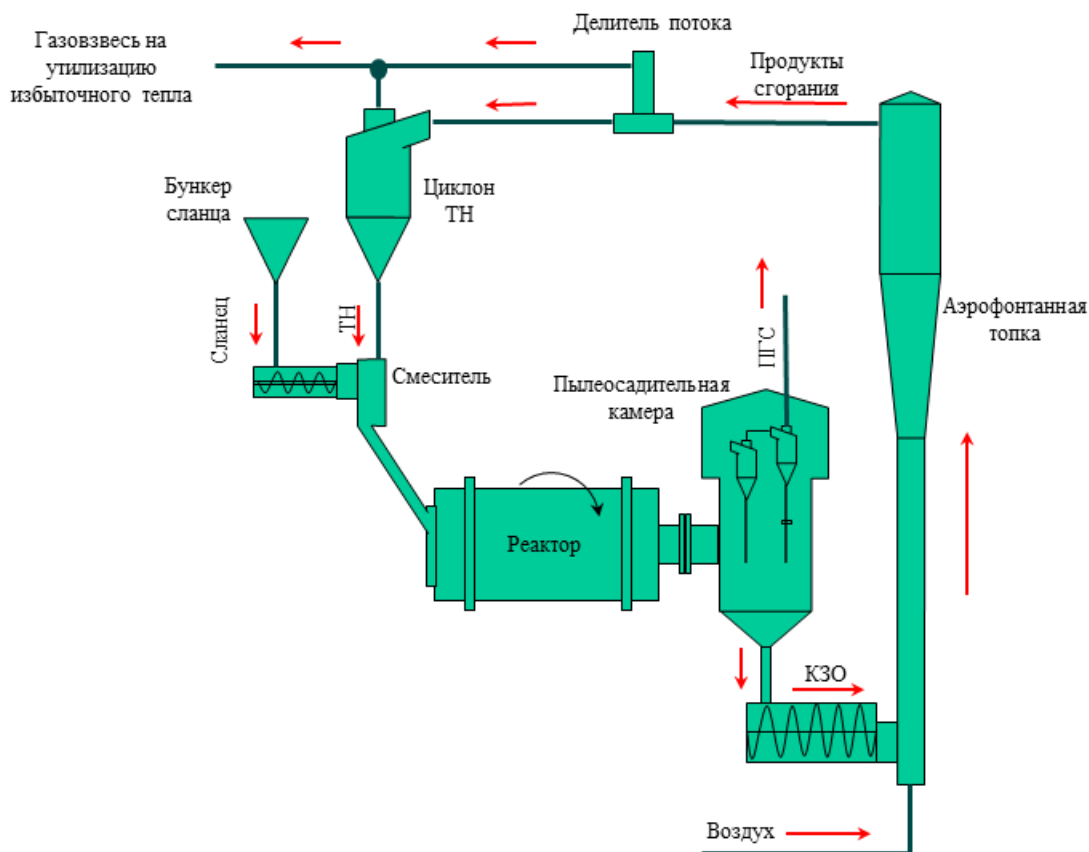


Рис. 1. Экспериментальный стенд

Основные задачи экспериментальных исследований:

- исследование изменения качества конечных продуктов в зависимости от изменения технологических параметров процесса (скорость нагрева, время пребывания продуктов в реакционной зоне, влияние фракционного состава и соотношения смешиваемых потоков и пр.)
- исследование физико-химических процессов;
- изучение закономерностей и качества смешивания двух разнородных полидисперсных потоков твёрдых материалов;
- исследование тепловых потоков в различных элементах схемы;

На рис.2 представлена принципиальная схема стенда.



ТН – теплоноситель; ПГС – парогазовая смесь; КЗО – коксозольный остаток

Рис. 2. Принципиальная схема контура твердого теплоносителя УТТ

Методика проведения эксперимента:

Транспортировочными шнеками выделенная в циклонах теплоносителя (ТН) зола с температурой 780-830 °С и холодный сланец подаются в смеситель. Далее смесь по наклонной тече поступает в реактор. Во вращающемся барабане реактора в результате тепломассообменных процессов осуществляется термическое разложение органической части топлива с выделением парогазовой смеси (ПГС) и коксозольного остатка (КЗО). Расход и балансовое соотношение между золой и сланцем регулируются скоростями вращения шнеков с помощью частотных преобразователей. Газообразные продукты поступают в пылеосадительную камеру, проходят циклонную очистку и поступают в трехступенчатую систему конденсации. Твердый материал (полукокс) стекает в нижнюю часть пылеосадительной камеры, откуда он выводится шнеком в аэрофонтанную топку. Здесь он подхватывается потоком воздуха, нагретого до 500 °С и в процессе транспортировки до циклона дожигается. Далее зола, попадая в циклон, отделяется от дымовых газов и поступает в бункер теплоносителя. И далее процесс повторяется.

Образующаяся при пиролизе парогазовая смесь из пылеосадительной камеры направляется в систему конденсации, состоящую из последовательно расположенных водоохлаждаемых конденсаторов тяжелой и легкой смол. Неконденсирующаяся часть парогазовой смеси (газ пиролиза) поступает в расходомер газа, а после него – в горелочное устройство, где и сжигается. Продукты сгорания удаляются в атмосферу.

Для отбора средней за опыт пробы газа пиролиза на анализ, служит газометр, соединённый тройником с горелкой и отводом с зажимом для отбора разовых проб.

В ходе эксперимента с помощью термопар и датчиков, установленных в различных точках технологического тракта, фиксируются температуры и гидравлические показатели процесса.

Для изучения процессов, протекающих при смешивании сланца с золой, проводится пробоотбор реагирующей смеси из наклонной точки и барабана. Материал из барабана забирается по всей его длине пробоотборником, который может быть установлен со стороны пылеосадительной камеры.

При разработке экспериментального стенда особое внимание было уделено способу дозирования горючего сланца и твёрдого теплоносителя. Для проведения процесса пиролиза горючего сланца в УТТ ему необходимо передать определенное количество теплоты посредством контакта с нагретым твёрдым теплоносителем в реакторе барабанного типа. Количество теплоты возможно регулировать как температурой твёрдого теплоносителя, так и непосредственно его количеством. Поэтому авторы работы провели отдельные исследования в области дозирования сыпучих материалов.

При дозировании сыпучих материалов различного типа и фракционного состава, в основном, применяются весовые способы дозирования, например, дозатор бункерный непрерывного действия Альфа ДВБН (ЗАО «Весоизмерительная компания «Тензо-М»). Однако подобные дозаторы рассчитаны на дозирование холодных сыпучих материалов и не могут применяться при работе с твёрдым теплоносителем в диапазоне температур 700-900 °С. Поиск готового технического решения в области дозирования высокотемпературных материалов не дал результатов, и было принято решение о разработке собственного дозатора (рис. 3).

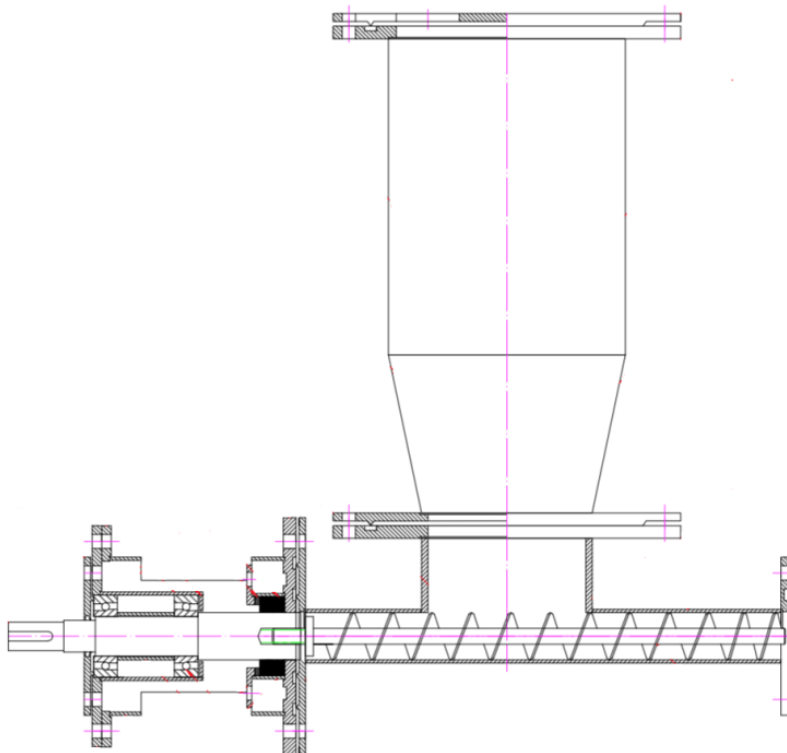


Рис. 3. Дозатор сыпучих материалов экспериментального стенда УТТ

Поскольку эксплуатация данного дозатора подразумевает использование сыпучего материала заранее известного фракционного состава и физико-механическими свойствами, необходимость в использовании сложного

весомизмерительного оборудования отпала. Были проведены замеры производительности дозатора в зависимости от:

- подаваемой на электродвигатель частоты электропитания (регулировалась с помощью частотного преобразователя);
- фракционного состава подаваемого материала.

Также было оценено влияние на производительность дозатора следующих факторов:

- уровня загрузки материала в бункере;
- температуры подаваемого материала;
- сегрегации материала внутри бункера дозатора.

В результате проведенных исследований было установлено, что:

1. Изменение уровня загрузки материала в бункере дозатора и изменение температуры подаваемого материала не приводит к существенным изменениям производительности дозатора. Полученные результаты удовлетворяют требованиям и соответствуют погрешности не более 2%;
2. Явление сегрегации сыпучего материала в бункере дозатора не подтвердилось;
3. Получена зависимость производительности дозатора от фракционного состава подаваемого материала (горючего сланца, кварцевого песка) и от подаваемой на электродвигатель частоты электроэнергии (табл. 1).

Таблица 1. Зависимость производительности дозатора (г/мин) от фракции материала и частоты электроэнергии.

f, Гц	Средний диаметр частиц, мм					
	0,1	0,35	0,75	1,5	2,5	4
50	51,66	66,27	66,64	71,88	86,24	102,87
40	42,62	58,80	55,66	55,59	71,26	80,98
30	33,25	43,55	40,31	41,50	53,97	58,22
20	20,75	27,34	25,73	26,30	34,70	37,65
$\delta$ (f)	1,0208(f) + 1,3386	1,3204(f) + 2,7738	1,3807(f) - 1,2388	1,5082(f) - 3,9688	1,7192(f) + 1,3706	2,1842(f) - 6,518

Расчёт производительности дозатора производится по следующей формуле:

$$\delta = K_1 \delta_1 + K_2 \delta_2 + K_3 \delta_3 + \dots + K_n \delta_n, \text{ где}$$

$d$  – производительность дозатора;

$K$  – процентное содержание определенной фракции;

$d_n$  – производительность по определенной фракции.

Сравнение теоретических и экспериментальных данных показывает возможность использования аналитической зависимости для расчета производительности дозатора (рис. 4).

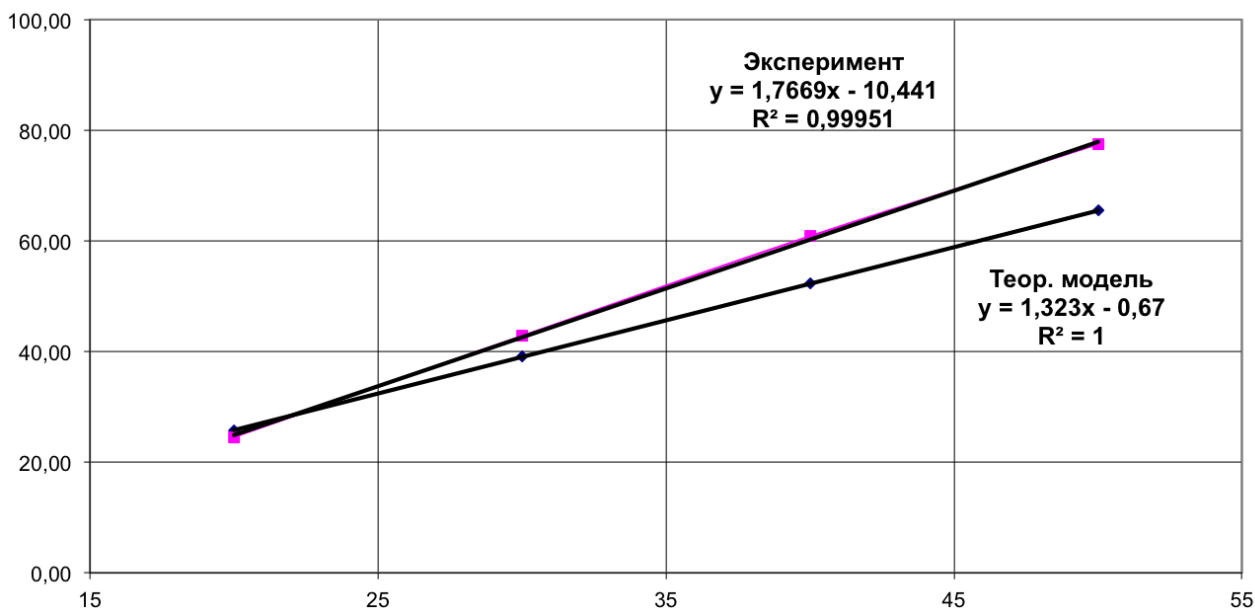


Рис. 4. Экспериментальные и расчётные данные

На горячем стенде проведены наладочные опыты, в ходе которых выявлены некоторые недостатки, требующие доработки. В том числе:

- Для обеспечения воспламеняемости полукокса в пусковой период необходим нагрев воздуха, подаваемого в аэрофонтанную трубу. В первых опытах нагрев воздуха производился в змеевике, расположенном в горизонтальной шахтной печи, что оказалось малоэффективным. В дальнейшем в качестве нагревателя был использован нагревательный элемент промышленного строительного фена, что позволило достичь необходимой температуры на входе в аэрофонтанную топку 500 °С.

- Имеют место значительные теплотери, из-за чего установка не может выйти на нужный температурный режим. Проблема решается поэтапно.

В бункере теплоносителя имеет место нерасчётное падение температуры от 900 °С в верхней части, до 600 °С на выходе в шнековый питатель, что объясняется неравномерностью съёма тепла с обогреваемых снаружи стенок бункера потоком теплоносителя, траектория движения которого определена конструкцией питателя. Для ликвидации этого недостатка принято решение об изменении конфигурации приёмного окна шнекового питателя и установки в бункер перемешивающего устройства.

На участке «бункер теплоносителя – реактор» перепад температур при первых пусках достигал значений 400 °С. Эти теплотери в основном происходили за счёт теплопроводности массивных металлических конструкций опор и корпуса шнекового дозатора. Для решения этой проблемы были установлены компенсационные нагреватели, что снизило теплотери до приемлемых значений 200 °С.

На участке «смеситель – реактор» перепад температур находится в пределах 150 °С, что несколько выше допустимого. Улучшить теплоизоляцию на этом участке предполагается за счёт использования накладных элементов, заполненных микроферами имеющими низкий коэффициент теплопроводности ( $\lambda \sim 0,08$  Вт/м·К).

Наиболее проблемной является теплоизоляция реактора – вращающегося барабана, на вход которого должен поступать высокотемпературный поток материала (700-750 °С). Обеспечить необходимый расчётный слой теплоизоляции на внешней поверхности вращающегося барабана практически невозможно. Кроме того оказалось, что повышенные потери тепла происходили через массивные опорные бандажи и торцевые фланцы. Решение проблемы возможно только за счёт размещения теплоизолирующего слоя на внутренней поверхности барабана и уменьшения массы барабана. На данный момент параллельно подготавливаются два варианта внутренней теплоизоляции нового барабана без опорных бандажей:

- Размещение внутри барабана теплоизолирующей трубы с низким коэффициентом теплопроводности;
- Размещение внутри барабана вакуумированной полости.

Также выявлены нарушения герметичности торцевого уплотнения барабанного реактора, вследствие нерасчётных термических расширений отдельных металлических элементов и сложностей с обеспечения фиксированного положения бандажей на опорах. Для решения этих проблем в корпусе нового барабана ликвидированы опорные бандажи, с переносом их функций на внешний опорный подшипник скольжения, а входное торцевое уплотнение барабана соединено со смесителем посредством теплоизолированного сильфона. Эти решения позволяют всей конструкции при нагреве свободно перемещаться в горизонтальном направлении, компенсируя температурные расширения и снимая при этом поперечные нагрузки на графитовые уплотнения.

После устранения выявленных недостатков предполагается начать опыты по пиролизу, используя в качестве наладочных материалов кварцевый песок в качестве теплоносителя, и малокалорийный антрацит в качестве топлива.

#### Библиографический список

1. Блохин А.И., Зарецкий М.И., Стельмах Г.П., Фрайман Г.Б. Энерготехнологическая переработка топлив твёрдым теплоносителем. М.: «Светлый СТАН», 2005-336 с.
2. Хасхачих В.В. Экспериментальное исследование тепло-массообменных процессов переработки горючего сланца в установке с твердым теплоносителем (УТТ) // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии. XVIII Бенардосовские чтения: материалы международной научно-технической конференции. II том. Теплоэнергетика. Иваново. 27-29 мая 2015. С. 220-223.
3. Хасхачих В.В. Экспериментальное исследование процесса смешения полифракционных сыпучих материалов в смесителе барабанного типа // Тезисы докладов XIII Всероссийской школы-конференции с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики». - Новосибирск. 20-23 ноября 2014 г. С.169-170.
4. Термическая переработка сланца-кукерсита. / Галынкер И.С., Губергриц М.Я., Тягунов Б.И. и др., под редакцией Губергрица М.Я. Таллин: "ВАЛГУС" , 1966. 355 с.
5. Спиваковский А. О., Дьячков В. К. Транспортирующие машины: Учебное пособие для машиностроительных вузов. 3-е изд., перераб. М.: Машиностроение, 1983.487 с.