

Э.П.ВОЛКОВ

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

Том 4

ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
СЛАНЦА

ПОСВЯЩАЕТСЯ ВСЕМ СОТРУДНИКАМ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ИМ. Г.М. КРЖИЖАНОВСКОГО (ЭНИН) —
руководителям, исследователям, лаборантам,
техникам и рабочим, чьим трудом была создана
лучшая в мире технология переработки
сланца, реализованная в наиболее
совершенных в мире и по тепловой,
и по общей экономичности
энерготехнологических установках УТТ-3000

Э. П. ВОЛКОВ

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

В ПЯТИ ТОМАХ

Москва
Издательский дом МЭИ
2015

Э.П.ВОЛКОВ

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

Том 4

ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
СЛАНЦА

Москва
Издательский дом МЭИ
2015

УДК 662.7
ББК 31.352
В 676

Волков Э.П.

В 676 Избранные труды: в 5 т. / Э.П. Волков. — М.: Издательский дом МЭИ, 2014 —.

ISBN 978-5-383-00877-5

Т. 4. Энергетехнологическое использование сланца. — 2015.
— 480 с.: ил.

ISBN 978-5-383-00934-5

Изложены научные основы, результаты исследований и этапы разработки самой совершенной в мире технологии переработки сланца с помощью твердого теплоносителя. Данная технология получения искусственной нефти (сланцевой смолы) может стать основой для решения проблем исчерпания мировых запасов традиционной нефти и создать конкуренцию в случае удорожания себестоимости ее добычи. Последовательно приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов пиролиза сланца, описаны лабораторные, стендовые и опытные установки, созданные при проведении работ, изложены основные закономерности процесса пиролиза сланца.

Выполнено сопоставление полученных теоретическим и экспериментальным путем данных с результатами промышленных испытаний крупных установок. Представлены методики расчета основного оборудования (реактора-пиролизера и аэрофонтанной топки), схема крупной промышленной установки УТТ-3000 производительностью 1 млн т сланца в год и ее технико-экономические показатели при работе на различных сланцах мира.

Книга предназначена для сотрудников научно-исследовательских институтов, аспирантов и инженерно-технических работников, интересующихся проблемами энергетехнологической переработки твердого топлива, а также для студентов технических вузов.

Табл. 68. Ил. 150. Библиогр. 272 назв.

554361

УДК 662.7
ББК 31.352

ISBN 978-5-383-00934-5 (т. 4)

ISBN 978-5-383-00877-5

© Волков Э.П., 2015

ФГАОУ ВО «Издательский дом МЭИ», 2015

БИБЛИОТЕКА
ФГАОУ ВО
Сибирский федеральный
университет

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	8
Глава 1. ПРОИСХОЖДЕНИЕ, РЕСУРСНЫЕ ЗАПАСЫ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ	13
1.1. Происхождение и условия залегания горючих сланцев	13
1.2. Ресурсные запасы горючих сланцев	18
1.2.1. Мировые запасы горючих сланцев	18
1.2.2. Запасы горючих сланцев в России	24
1.3. Классификация керогена по типам и основные характеристики горючих сланцев	26
1.3.1. Классификация керогена по типам	26
1.3.2. Строение макромолекулы керогена	34
1.3.3. Химико-технологические характеристики сланцев	43
Глава 2. РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ	49
2.1. Общие представления о термической переработке горючих сланцев	49
2.2. Термическое разложение керогена	53
2.3. Вторичные химические реакции	57
2.4. Развитие термической переработки горючих сланцев	61
2.5. Зарубежные технологии термической переработки горючих сланцев	80
2.5.1. Процесс «Лурги—Рургаз»	80
2.5.2. Процесс «Тоско-II»	83
2.5.3. Процесс «Юнион»	86
2.5.4. Процесс «Петросикс»	90
2.5.5. Процесс «АОСТРА—Тасиょк» (АТР)	96
2.6. Установки ЭНИН им. Г.М. Кржижановского с твердым теплоносителем (УТТ)	101
2.6.1. Принципиальная технологическая схема установок ЭНИН	101
2.6.2. Пилотная установка УТТ-2,4	105
Глава 3. МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	115
3.1. Термодинамический подход	116
3.1.1. Уравнения химической термодинамики	116
3.1.2. Программный комплекс ТЕТРАН	121
3.1.3. Термодинамический расчет основных узлов установки с твердым теплоносителем	123
3.2. Кинетические модели пиролиза сланца	131
3.2.1. Одностадийные модели	132
3.2.2. Модель функциональных групп	135
3.2.3. Диффузионно-кинетическая модель	145
3.3. Гидродинамическая модель среды	149
3.3.1. Движущийся слой	150
3.3.2. Спутный поток	152
3.3.3. Кипящий слой	154
3.4. Математическая модель реактора-пиролизера барабанного типа	160
3.4.1. Движение сыпучего материала в реакторе	160
3.4.2. Теплообмен между частицами топлива и теплоносителя	163
3.4.3. Термическое разложение керогена и выход сланцевого масла	165
3.4.4. Результаты численного моделирования	169

Глава 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ	179
4.1. Влияние различных факторов на выход летучих	179
4.1.1. Влияние температуры, скорости нагрева и времени на выход летучих ..	179
4.1.2. Влияние фракционного состава сланца и теплоносителя на выход летучих	195
4.1.3. Влияние состава минеральной части теплоносителя на выход и состав продуктов термического разложения сланца.....	197
4.2. Перемешивание сланца и теплоносителя	203
4.3. Изменение механических свойств и фракционного состава сланца-кукерсита в процессе сушки и разложения его органической массы.....	212
4.4. Полукокс, его выход и состав.....	222
4.5. Соотношение С/Н как критерий завершенности процесса пиролиза	228
4.5.1. Зависимость соотношения С/Н в полукоксе от степени разложения керогена сланца	229
4.5.2. Поправка на различные соотношения С/Н в смесях и полукоксе сланца	234
Глава 5. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПИРОЛИЗА СЛАНЦЕВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТВЕРДОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ	239
5.1. Общая постановка задачи	239
5.2. Полуэмпирическое решение задачи разложения сланца.....	255
5.3. Условия движения сыпучего материала в реакторе-пиролизере	261
5.3.1. Общие положения.....	261
5.3.2. Функции распределения частиц по времени пребывания их в реакторе	263
5.3.3. Экспериментальные возможности нахождения функций распределения	264
5.3.4. Среднее значение и разброс распределения частиц по времени пребывания их в реакторе	268
5.4. Определение коэффициента эквивалентной диффузии.....	270
5.5. Температурно-временные условия эвакуации летучих пиролиза.....	272
5.6. Гранулометрический состав сырья при пиролизе.....	274
5.7. Стендовая маломасштабная установка и методика проведения экспериментов	276
5.7.1. Общие положения.....	276
5.7.2. Схема и принцип работы СМУ	277
5.7.3. Подготовка СМУ к балансовому опыту и методика проведения экспериментов.....	280
5.7.4. Методика обработки результатов балансового опыта	284
5.8. Технические характеристики реактора-пиролизера	285
5.8.1. Отклик на возмущение в модели бункерного реактора СМУ	285
5.8.2. Отклик на возмущение в модели барабанного реактора УТТ-500.....	288
5.8.3. Основные характеристики функций распределения	290
5.8.4. Влияние типа реактора на степень термического разложения сланца	291
5.8.5. Предварительные оценки тестирования СМУ	294
5.9. Основные показатели процесса УТТ при использовании сланца-кукерсита	295
Глава 6. СЖИГАНИЕ СЛАНЦЕВОГО КОКСОЗОЛЬНОГО ОСТАТКА В АЭРОФОНТАННОЙ ТОПКЕ	300
6.1. Особенности состава и характеристика коксозольного остатка, используемого в качестве топлива	300
6.2. Гидродинамика аэрофонтанирующего слоя	302
6.3. Вертикальная транспортировка смеси газов и КЗО	305

6.4. Процесс горения сланцевого коксозольного остатка	309
6.5. Исследование на модели основных показателей процесса аэрофонтонирования	315
6.5.1. Некоторые аспекты моделирования аэрофонтанных аппаратов	315
6.5.2. Экспериментальная установка и методы измерений	322
6.5.3. Характеристики материала, применявшегося в опытах	325
6.5.4. Время стабилизации аэрофонтонирующего слоя	327
6.5.5. Зависимость времени пребывания материала в аэрофонтанной камере от скорости воздуха, производительности питателя и свойств материала	335
6.6. Анализ результатов экспериментов	341
Глава 7. УСТАНОВКИ УТТ-200, УТТ-500 И СТЕНДОВАЯ МАЛОМАСШТАБНАЯ УСТАНОВКА. ИХ ИСПЫТАНИЯ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ.....	345
7.1. Сопоставительный анализ показателей процессов пиролиза сланца-кукерсита на установках УТТ-200, УТТ-500 и СМУ	345
7.1.1. Установки УТТ-200, УТТ-500 и их технологические параметры	345
7.1.2. Степень разложения органической массы сланца в полуокссе и оптимальная производительность реактора УТТ-200	350
7.1.3. Распределение сыпучей массы и время пребывания материала в реакторах УТТ-200 и УТТ-500. Проверка экспериментальных зависимостей на промышленных образцах	355
7.1.4. Сравнительный анализ характеристик процесса пиролиза сланца на установке УТТ-500 и стендовой маломасштабной установке	359
7.1.5. Методика расчета барабанных реакторов-пиролизеров	367
7.2. Испытания аэрофонтанной технологической топки на опытно-промышленном образце УТТ-500 и сопоставительный анализ результатов с данными стендовых исследований.....	376
7.2.1. Общие положения. Аэрофонтанная топка и методы измерений.....	376
7.2.2. Измерение дисперсных характеристик сланцевого коксозольного остатка	377
7.2.3. Поля температур и состав дымовых газов по высоте и сечениям АФТ	381
7.2.4. Время пребывания материала в АФТ	388
7.2.5. Перепад давления в аэрофонтанной топке	392
7.2.6. Анализ обрабатываемого материала на содержание серы.....	395
7.2.7. Сопоставление результатов экспериментов на модели и опытно-промышленном образце	396
7.2.8. Методика расчета аэрофонтанной топки для агрегатов УТТ	400
7.2.9. Основные выводы по результатам экспериментальных исследований АФТ	405
Глава 8. ОЧИСТКА ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ	408
8.1. Основные положения	408
8.2. Очистка парогазовой смеси в установке УТТ-200	409
8.2.1. Циклоны для очистки ПГС	410
8.2.2. Электрофильтры для очистки ПГС	419
8.3. Очистка парогазовой смеси в установке УТТ-500	420
8.4. Очистка парогазовой смеси в установке УТТ-3000	423
Глава 9. УСТАНОВКИ УТТ-3000 И ИХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ РАБОТЕ НА РАЗЛИЧНЫХ СЛАНЦАХ МИРА	427
Список литературы	466

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий том — единственная книга избранных трудов, которая не имеет предисловия внешнего эксперта. Связано это с тем, что данный том, кроме работ автора, содержит большой материал многих сотрудников ЭНИН по энерготехнологическому использованию сланца, которые, начиная с 1946 г., путем последовательных исследований и разработок создали уникальную технологию переработки сланца с применением твердого теплоносителя в целях получения искусственной нефти и других полезных продуктов. Вот уже более 20 лет эта технология используется в реальной практике и по своим показателям является лучшей в мире.

Исследования касались многих аспектов теоретических и экспериментальных сторон сложного явления преобразования органической массы сланца в жидкие и газообразные высококалорийные товарные продукты.

Многочисленные экспериментальные исследования, проведенные в 50—60-е годы прошлого века Д.А. Вороной, Н.С. Мирингофом, О.А. Цухановой, А.С. Клейменовой под руководством доктора техн. наук, проф. И.С. Галынкера, чл.-корр. АН СССР Л.С. Хитрина и доктора техн. наук А.А. Агроскина, послужили основой для определения выхода летучих и качества получаемых продуктов в зависимости от температуры и скорости нагрева, фракционного состава исходного топлива, времени выдержки испытуемых образцов при различных температурах и других параметров.

Накопленные первичные данные послужили базой для создания лабораторных стендов, на которых имитировались отдельные процессы термической переработки сланцев в сочетании с теплоносителем или в холодном состоянии с использованием трассеров для изучения процессов перемешивания сланца и теплоносителя. При научнообоснованном подходе такие стены были изготовлены, и исследования на них были проведены в разное время кандидатами техн. наук К.А. Иорудасом, Г.А. Красновским, А.В. Перепелкиным, Н.Н. Шипковым и М. Маргусте. В результате были получены исходные данные,

граничные условия и параметры режимов, которые позволили создать опытно-промышленные установки УТТ-200 и УТТ-500 для дальнейшей отработки технологии. Именно эти установки позволили обрести уверенность в адекватности найденных расчетным и экспериментальным путями данных для создания главной промышленной установки УТТ-3000. С использованием результатов испытаний установок УТТ-200 и УТТ-500 стала возможной разработка методики расчета основных агрегатов комплексной установки по переработке сланцев с применением твердого теплоносителя: реактора-пиролизера и аэрофонтанной топки и сушилки. Эти работы были проведены кандидатами техн. наук К.А. Иорудасом, Г.А. Красновским, А.В. Перепелкиным под руководством докторов техн. наук, профессоров И.С. Галынкера, М.Я. Губергрица, В.А. Спейшера и канд. техн. наук Ю.М. Иванова.

Все это и явилось базой для реализации в двух экземплярах промышленных установок УТТ-3000 (установка на основе твердого теплоносителя по переработке сланца производительностью 3000 т в сутки), сооруженных на Эстонской ГРЭС недалеко от г. Нарва. Эта технология, известная как технология комплексной (энергетехнологической) переработки сланца ЭНИН, за рубежом часто называется технологией «Галотер» по имени человека, который первым предложил этот способ переработки сланца с помощью подведенного тепла и получил на него патент. Это сотрудник ЭНИН доктор техн. наук, проф. И.С. Галынкер. Именно поэтому способ термической переработки твердого топлива назван «Галотер». И.С. Галынкер руководил экспериментальными работами по переработке сланцев до 1969 г. После его кончины руководителем и организатором работ по созданию промышленной установки УТТ-3000 стал его соратник канд. техн. наук Б.И. Тягунов. Являясь человеком незаурядным, прошедшим через тяготы Великой Отечественной войны, и участником Сопротивления, он смог создать сплоченный коллектив сотрудников ЭНИН, который кроме продолжения научных исследований осуществил подготовку сотрудников проектных организаций для решения важной задачи — проектирования, изготовления и пуска двух установок УТТ-3000. Конструкторскую документацию всех узлов установки подготовили сотрудники института «Оргэнергострой», а общую компоновку и проектную документацию разработали сотрудники Ленинградского (в ту пору) отделения

института «Теплоэлектропроект». Главным инженером проекта являлся А.Б. Лернер, которого в 1979 г. сменил Б.С. Соломаха.

История создания установки УТТ-3000 является достаточно драматичной. Переход от предыдущей установки УТТ-500 (масштаб 6) оказался сложным, особенно в части работы ряда элементов, в первую очередь узла очистки парогазовой смеси от твердых частиц, шнеков, подающих горячий полукокс, и другого оборудования. Кроме того, при изготовлении установки не были получены специальные материалы (циркониевый кирпич, жаростойкие металлы и др.), поэтому процесс освоения первых двух установок затянулся почти на 10 лет. При разрешении возникших проблем большую роль сыграл министр (в 80-х годах прошлого столетия) энергетики и электрификации СССР А.И. Майорец. Именно благодаря его помощи в эпоху все резче звучавшей критики о неработоспособности установок были найдены финансовые ресурсы, которые позволили осуществить реконструкцию этих установок, после чего началась устойчивая их работа.

Определяющую роль в наладке установок сыграл инж. В.И. Чикул — впоследствии заслуженный энергетик Эстонии. Он являлся тем человеком, который персонально держал в руках все нити сложной работы по пуску установок. Кроме него существенный вклад в освоение установок внесли и другие работники ЭНИН: в первую очередь Д.С. Ворона, М.С. Петров, начальник установки А.Н. Кайдалов и большая группа сотрудников, работавших в лаборатории ЭНИН, специально созданной на Эстонской ГРЭС.

Необходимо отметить большую роль в освоении установок директора Эстонской ГРЭС К.И. Сенчугова, который много сил вложил и в организационную, и в техническую работу. В настоящее время, когда получение «искусственной» (альтернативной) нефти стало актуальным, данная технология приобрела особое значение. В Эстонии, где в конце 80-х годов минувшего века акад. Эстонской АН Э.Т. Липмааставил вопрос о закрытии установок и их демонтаже в связи с экологически неблагоприятным (якобы) воздействием на природу, сегодня на установки ЭНИН повесили таблички «Enefit» и выдают их за установки, работающие по эстонской технологии. Еще две установки в г. Кивиыли, имеющие те же технологию и параметры, что и установки ЭНИН, назвали установками, построенными по технологии «Petroterm».

Так некоторые эстонские инженеры и компании (в том числе и государственная компания «Ээсти энергия») вольно распоряжаются интеллектуальным наследием сотрудников ЭНИН. Есть и российские фирмы, которые претендуют на право разработки иностранных проектов (ни в коем случае не в России) с декларацией разработки технологии переработки сланца с применением твердого теплоносителя. Особенно активна частная фирма «ТТУ Лтд», которая была образована намного позже того, как установки УТТ-3000 уже работали на полной мощности, что не смущает владельцев фирмы. Но пусть эти большие и мелкие «букашки» суетятся на «технической арене» — они даже не понимают, что значит **разработать** подобную технологию, а не скопировать ее.

Для широкого круга научных работников и в целом людей, занимающихся использованием сланцев в любых странах мира, благодаря многочисленным публикациям в течение около 50 лет, докладам на внутренних (в СССР и РФ) и международных конференциях, в том числе на конгрессе Мирового энергетического совета в г. Хьюстон (США), данная технология является разработкой ЭНИН им. Г.М. Кржижановского. Недаром Международный комитет в 2008 г. присудил высшую научную награду в области энергетики — Международную премию «Глобальная энергия» данной технологии ЭНИН.

В последние годы ученые ЭНИН не единожды выполняли экспериментальные исследования и предпроектные проработки по заказам различных компаний и организаций в целях переработки сланцев разных месторождений мира по данной технологии. Наиболее серьезные исследования были связаны с переработкой сланцев Израиля, Иордании, Марокко и США. В Израиле ЭНИН в составе совместного предприятия «Ойл Шелл» выиграл тендер, в котором участвовали 53 компании из различных стран мира, в том числе АББ, «Энрон», «Ормат» и др. Так случилось, что в те годы для начала выполнения проекта, по которому израильское правительство выделило 19 % его стоимости в виде помощи (около 75 млн долл. США), Россия не смогла перевести в уставной фонд к началу работы над проектом сумму в 1,5 млн долл., несмотря на письменные гарантии в ту пору недавно образованного РАО «ЕЭС России». Такие были у нас в стране времена в 90-е годы прошлого столетия. Автор этих строк неоднократно встречался с руководством компаний «Хеврат хаэмаль» (Израиль), несколькими мини-

страми энергетики Израиля, в том числе с Ариэлем Шароном, премьер-министрами Израиля (Ицхаком Рабином) и Иордании (Али Абу Аль-Ратхеб), королями Иордании и Марокко, и в этих странах, в которых сланец является, пожалуй, единственным сырьем, знают о технологии ЭНИН.

Дело же всей жизни многих сотрудников ЭНИН будет долго существовать в виде работающих установок, в том числе и новых, пусть даже скопированных, а главное — новых разработок и исследований, которые продолжаются потомками пионеров, создавших данную замечательную технологию.

И еще одним штрихом, напоминающим об их работе, еще одной вехой памяти о них станет и эта книга, написанная сотрудником ЭНИН — участником и руководителем работ и по реконструкции, и по пуску установок УТТ-3000, и по разработке теоретических основ их работы, и по развитию исследований, направленных на широкое энерготехнологическое использование сланцев.

Теоретические работы выполнялись в плодотворном сотрудничестве с докторами техн. наук, профессорами Г.Я. Герасимовым и Е.В. Самуйловым.

Большую помощь в подборе материалов по исследованиям и разработке технологии УТТ оказали кандидаты техн. наук С.А. Фадеев и О.П. Потапов. Совместно с О.П. Потаповым написаны § 1.1 и гл. 2 и 8.

Автор
(Слынчев Бряг, Болгария, июль—август 2014 г.)