

<https://doi.org/10.3176/chem.1983.2.01>

УДК 665.7.032.57

И. ЭПИК

ВАЖНЕЙШИЕ ОПЫТНЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ И ДЕМОСТРАЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ

В предыдущем обзоре* о современном состоянии мировых ресурсов горючих сланцев и проектах их использования даны классификация и основные характеристики важнейших опытных промышленных, демонстрационных и пилотных установок для термической переработки горючих сланцев, но не приведены их описания. Данным обзором мы попытаемся восполнить этот пробел.

По данным [1], количество исследовательских групп, занимающихся термической переработкой горючих сланцев, за 1975—1980 гг. возросло от 7 до 100. Во всем мире на различных стадиях изучения находились 37 схем или проектов, связанных с извлечением искусственного жидкого топлива (ИЖТ) из сланцев [1]. Многочисленность и разнотипность опытных установок для переработки горючих сланцев обусловлены, с одной стороны, патентными соображениями, а с другой, различием горючих сланцев разных месторождений. Качество горючих сланцев зависит от содержания в нем керогена и свойств последнего. Содержание керогена определяет теплоту сгорания сланцев. Свойства керогена определяют возможности реализации теплоты сгорания сланца в жидких и газовых продуктах, получаемых при переработке.

Представление об изменчивости сланцев по разным месторождениям дает табл. 1, где на основе исследований НИИсланцев [2] приведены данные о теплоте сгорания, выходе смолы горючих сланцев Эстонской (кукерсит), Украинской (менилитовый и болтышские), Узбекской (месторождения Байсун, Уртабулак, Сангрунтау), Казахской (кендерлыкский и усть-каменогорский) и Белорусской ССР (любанский). Приведены также некоторые сведения о сланцах США (колорадские), Марокко (Тимахдит), КНР (Фушунь) и Австралии (Стюарт) [3—5]. Данные табл. 1 показывают, что при полукоксовании в стандартной алюминиевой реторте теплота от сгорания получаемой сланцевой смолы составляет 21—71% теплоты сгорания исходного сланца независимо от величины последней. При переработке в пилотном газогенераторе НИИсланцев, мощностью около 500 кг сланца в сутки, картина примерно такая же. Поскольку выходы смолы в пилотном газогенераторе колеблются в пределах 43—98% выхода смолы в алюминиевой реторте, то здесь разброс еще больше, теплота сгорания сланцевой смолы в разных пробах составляет 9—69% химического тепла исходного сланца.

Химическое тепло сланца при полукоксовании распределяется между смолой (искусственным жидким топливом — ИЖТ), газом (включая газовый бензин) и полукоксом. При неблагоприятном выходе ИЖТ большое количество энергии остается с углеродом в полукоксе, а иногда — в крайне низкокалорийном генераторном газе теплотой сгорания ниже 2 МДж/м³, не имеющем практического применения. Пилотный

* Изв. АН ЭССР. Геол., 1982, т. 31, № 2, с. 42—55.



Теплота сгорания и выход смолы различных горючих сланцев

Месторождение или наименование горючего сланца	Теплота сгорания сланца по бомбе, МДж/кг	Полукоксование в алюминиевой реторте				Переработка в пилотном газогенераторе НИИсланцев				
		Выход смолы, %	Теплота сгорания смолы по бомбе, МДж/кг	Выход теплоты сланца в смолу, ДЖ/Дж	Содержание углерода в полукоксе, %	Выход смолы, %	Теплота сгорания смолы по бомбе, МДж/кг	Выход теплоты сланца в смолу, ДЖ/Дж	Содержание углерода в твердом остатке, %	Высшая теплота сгорания газа, МДж/м ³
Любанское	5,65	8,8	41,45	0,65	4,2	6,3	41,68	0,46	0,1	1,84
Сангрунтау	6,32	6,1	40,82	0,39	6,6	3,7	40,15	0,24	2,5	0,88
Менилитовые	6,53	3,4	39,90	0,21	10,5	1,46	39,98	0,09	5,0	1,34
Усть-Каменогорск	7,91	10,9	42,83	0,59	6,4	9,6	41,15	0,51	1,0	2,13
Уртабулак	10,55	9,4	40,49	0,36	9,4	6,4	40,69	0,25	3,0	1,88
Болтышское	10,63	15,0	42,7	0,6	—	—	—	—	—	—
Байсунское	10,93	11,7	40,95	0,44	11,0	10,2	41,16	0,38	5,4	2,55
Болтышское	12,14	15,8	42,70	0,56	9,1	12,1	42,29	0,42	0,8	2,43
Кукерсит	12,43	21,8	40,23	0,71	7,8	21,7	39,77	0,69	1,2	2,39
Болтышское	12,73	17,5	42,7	0,59	10,5	10,5	42,58	0,35	2,3	4,02
Кендерлыкское	12,94	19,8	41,66	0,64	10,2	17,1	42,87	0,57	4,9	2,26
Кукерсит	13,15	22,9	40,19	0,70	8,0	20,2	39,94	0,61	2,4	2,47
Колорадо	3,82	6,54	41,47	0,71	2,0	—	—	—	—	—
Тимахдит	4,87	6,83	38,70	0,54	5,3	—	—	—	—	—
Стюарт	5,50	6,9	43,07	0,54	4,7	—	—	—	—	—
Колорадо	5,67	10,5	40,09	0,74	—	—	—	—	—	—
Фушунь	6,15	6,5	—	—	—	—	—	—	—	—

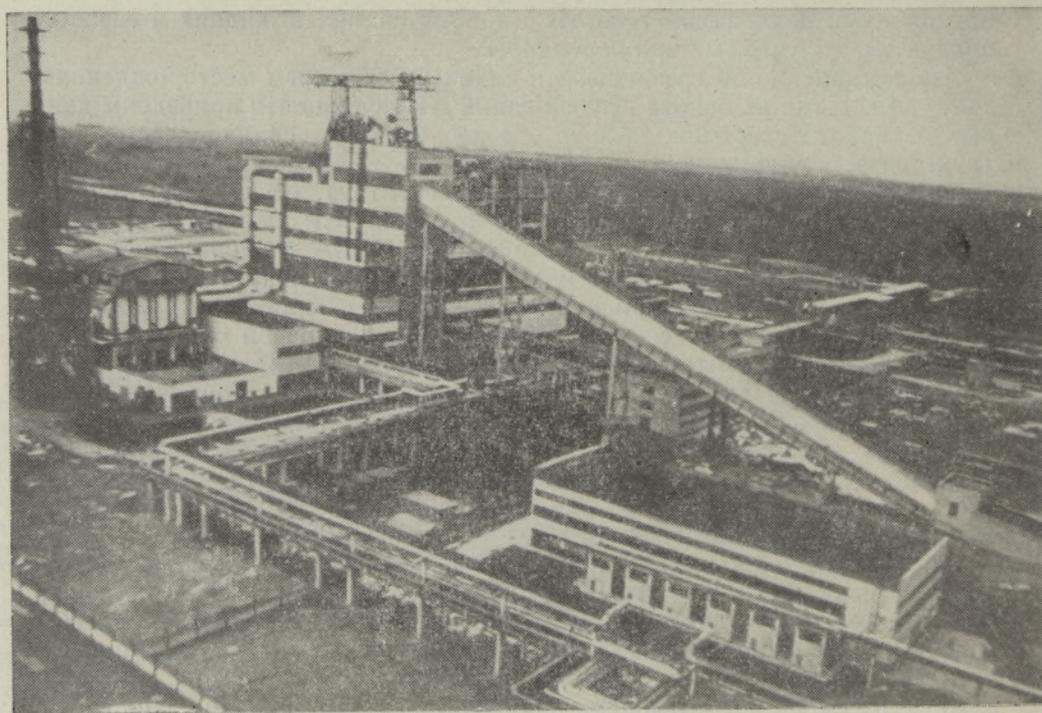


Рис. 1. Две УТТ-3000 на Эстонской ГРЭС.

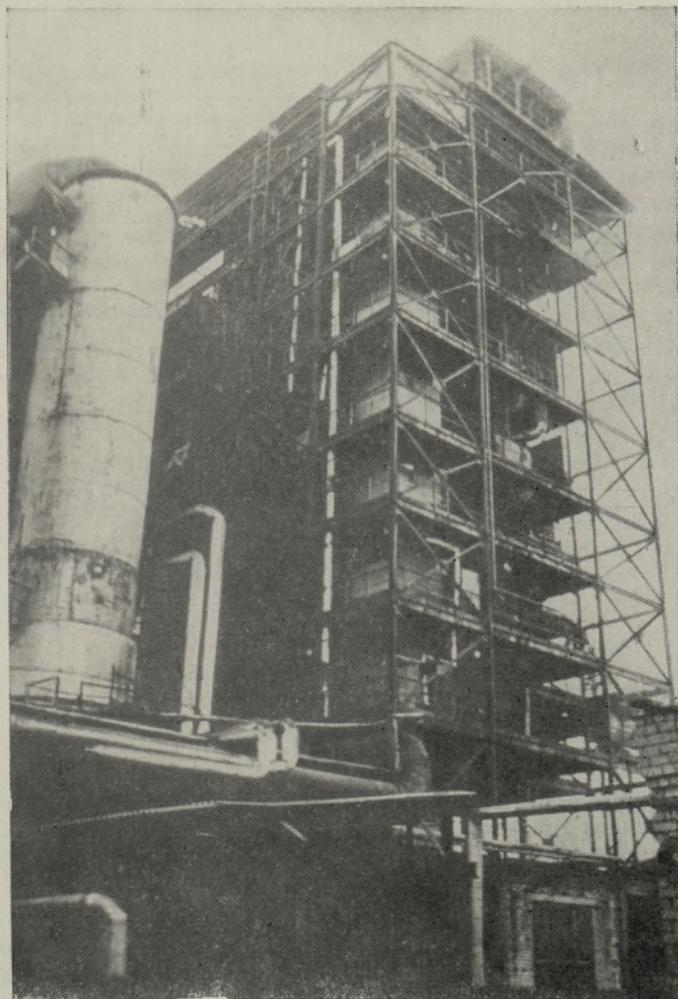


Рис. 2. Генератор мощностью 1000 т сланца в сутки, производством до 180 т сланцевой смолы в сутки на СПК им. В. И. Ленина.

газогенератор НИИсланцев в качестве источника тепла для переработки сланца использует газификацию (сжигание) полукокса, которая, по утверждению [2], протекает глубже, чем в промышленных газогенераторах.

Отечественные опытные промышленные установки

Самые крупные в мире опытные промышленные установки для переработки горючих сланцев созданы в Советском Союзе (в Эстонской ССР). Два агрегата с твердым теплоносителем по схеме «Галотер» пропускной способностью по 3000 т в сутки (УТТ-3000) и проектной производительностью по 388 т (2800 нефтяных баррелей) сланцевой смолы в сутки сооружаются на Эстонской ГРЭС им. 50-летия СССР (рис. 1) [6].** Это самые производительные в мире установки для переработки сланцев по всем проектным показателям. В настоящее время завершаются

** Данные о технике и экономике прямого сжигания сланцев [6] требуют пересмотра.

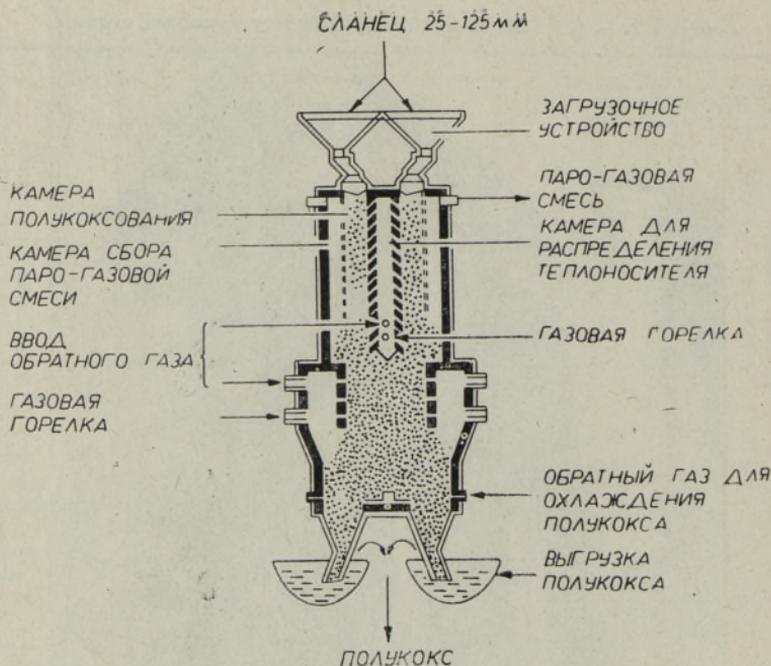


Рис. 3. Схема сланцевого генератора «Кивитер» пропускной способностью 1000 т сланца в сутки.

работы по вводу их в действие. Самый производительный агрегат среди установок с газовым теплоносителем — это сланцевый газогенератор (или просто генератор, т. к. основной продукцией его является смола, а попутной — газ) со схемой «Кивитер» на СПК им. В. И. Ленина в г. Кохтла-Ярве (рис. 2); его проектная пропускная способность 1000 т обогащенного сланца-кукерсита в сутки и производительность 180 т (1300 нефтяных баррелей) сланцевой смолы в сутки. Генератор работает с 1981 г. и до ввода в действие УТТ-3000 останется самой производительной в мире (по выходу смолы) установкой для переработки горючих сланцев.

Сланцевый генератор пропускной способностью 1000 т в сутки «Кивитер» (рис. 3) предназначен для переработки кускового сланца размерами 25—125 мм. Поток газового теплоносителя в генераторе поперечный в отношении движения сланцевой шихты [7]. Разработке «Кивитера» предшествовало создание целого ряда конструкций газогенераторов на заводах в Кохтла-Ярве, Кивиыли и Сланцах, начиная с генераторов фирмы «Пинч» (в 1924 г. в Кохтла-Ярве) пропускной способностью 35 т в сутки. Первоначально эти установки были чисто газогенераторного типа с шахтой полукоксования в верхней части газогенератора и со встречными потоками движения сланца (сверху вниз) и теплоносителя (продукты сгорания полукокса из нижней части газогенератора вверх).

Использование поперечного потока теплоносителя (ППТ) в новых генераторах было обусловлено существенным увеличением поперечного сечения для пропуска теплоносителя. Одновременно это привело к замене источника тепловыделения и тем самым к отказу от принципа работы газогенератора: в качестве теплоносителя стали применять продукты сгорания газа, сжигаемого в специальных горелках. В результате была создана реторта с внутренним газовым обогревом для полукоксования сланца и выходом отработанного сланца в виде полукокса,

Расчетные показатели сланцевого генератора 1000 т в сутки и УТТ-3000

Показатели	Единица измерения	Генератор «Кивитер»	УТТ-3000 «Галотер»
Сланец-кукерсит:		обогащенный	рядовой
размер кусков	мм	25—125	20
влажность, W^p	%	9	9,5
высшая теплота сгорания сухой массы, Q_b^c	МДж/кг	13,45	10,39
низшая рабочая теплота сгорания, Q_n^p	„	11,30	8,62
выход смолы в лабораторной алюминиевой реторте	%	23,5	18,2
Мощность по сланцу	т/сутки	1000	3000
то же, по смоле	„	180	388
Выход смолы	%	18	12,9
Выход смолы от лабораторного потенциала	%	84	79
Выход газа (включая газовый бензин)	м ³ /т	430	42,8
Низшая теплота сгорания смолы, Q_n^p	МДж/кг	37,4	38,1
Низшая теплота сгорания газа, (включая газовый бензин), Q_n^p	МДж/м ³	4,3	49,8
Рабочее тепло сланца:			
в смоле	Дж/Дж	0,60	0,57
в газе (включая газовый бензин)	„	0,16	0,25
в смоле и газе суммарно	„	0,76	0,82
Относительные капитальные затраты на добычу и переработку, отнесенные на продукцию смолы*	—	1	1,29
в том числе:			
на переработку	—	0,34	0,79
на добычу (включая обогащение)	—	0,66	0,50
То же, отнесенное на продукцию смолы и газа (в условном топливе)	—	0,79(1)	0,90 (1,14)

* Расчет проведен И. З. Кагановичем.

содержащего при переработке обогащенного кукерсита более 10% горючих (углерода). При переработке обогащенного кукерсита по сугубо газогенераторной схеме (табл. 1) в золе остается 1,2—2,4% углерода, а наивысшая теплота сгорания газа составляет лишь 2,4—2,5 МДж/м³ против 4,6 МДж/м³, получаемых в «Кивитере» (расчетные технологические показатели генератора со схемой «Кивитер» приведены в табл. 2).

При полукосовании богатого керогеном сланца-кукерсита усугубленные степени измельчения сланца способствует сильной битуминизации загрузки и приводит к образованию в генераторах настывлей и прогаров. Поэтому крупность обрабатываемого в генераторах обогащенного кускового сланца колеблется в пределах 25—125 мм. Эти размеры кусков сланца согласуются с требованиями к технологии обогащения сланца в тяжелых жидкостях, применяемого на сланцедобывающих предприятиях ПО «Эстонсланец». Опытами, проведенными в НИИсланцев [3], показано, что применяя необогащенный рядовой сланец теплотой сгорания $Q_n^p = 8,0—8,4$ МДж/кг, можно уменьшить размеры кусков сланца до 8—75 мм и в таком случае в перспективе использовать генераторы «Кивитер» единичной пропускной способностью 10 тыс. т сланца в сутки, произведящие около 1100—1200 т смолы (около 8500 баррелей) в сутки. Сланцевый генератор мощностью 1000 т сланца в сутки «Кивитер» создан в НИИсланцев совместно с СПК им. В. И. Ленина ПО «Сланцехим».

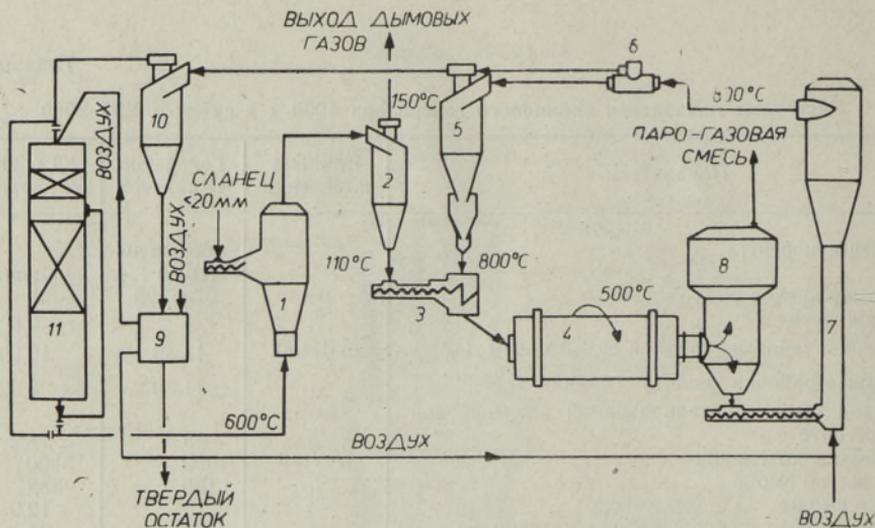


Рис. 4. Технологическая схема переработки сланца в УТТ-3000 по методу «Галотер»: 1 — аэрофонтанная сушилка; 2 — циклон-сепаратор сухого сланца; 3 — смеситель; 4 — барабанный реактор; 5 — циклон-сепаратор теплоносителя; 6 — байпас, регулирующий поток теплоносителя в реактор; 7 — аэрофонтанная топка для сжигания полуккокса; 8 — отделитель твердой фазы и парогазовой смеси; 9 — зольный теплообменник для подогрева воздуха; 10 — циклон-сепаратор золы; 11 — котел-утилизатор.

Установка для термической переработки сланца с твердым теплоносителем УТТ-3000 по методу «Галотер» (рис. 4 и табл. 2) предназначена для переработки рядового сланца крупностью менее 20 мм. Метод предложен ЭНИН им. Г. М. Кржижановского совместно с Институтом химии АН ЭССР, НИИсланцев и сланцехимическим заводом «Кививили» и конструктивно подготовлен на эксплуатируемой с 1964 г. опытно-промышленной установке УТТ-500 производительностью 500 т сланца в сутки. До 1 января 1975 г. на УТТ-500 переработано 1,365 млн. т сланца-кукерсита средней влажностью 12% и теплотой сгорания $Q_6^* = 12,2$ МДж/кг. Получено 182,1 тыс. т (13,3%) смолы и 74,8 млн. м³ (54,8 м³/т) газа теплотой сгорания 42 МДж/м³. Получаемую на Эстонской ГРЭС из двух агрегатов УТТ-3000 сланцевую смолу предусматривается сжигать в топке реконструированного котла, а газ совместно со сланцем — в топках всех котлов ГРЭС. Имеется в виду также возможность получить 75 тыс. т газотурбинного топлива в год.

При переработке кукерсита в УТТ-500 отработанный сланец содержал в существенном количестве водорастворимые сульфиды и полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). При отработке и наладке рабочих режимов новых УТТ-3000 преследуют цель устранения этих недостатков. Авторы проекта УТТ-3000 считают вполне реальной разработку УТТ-10000 пропускной способностью до 3 млн. т сланца в год.

Средства, необходимые для сооружения относительно простых генераторов, перерабатывающих кусковой сланец, значительно скромнее, чем на сооружение УТТ той же производительности. Даже дополнительные капитальные вложения в обоганительную фабрику для обогащения кускового сланца окупаются с большим избытком. Отсюда следует, что при любом способе использования прибалтийского сланца-кукерсита целесообразно иметь в виду это преимущество кускового сланца. Кусковой сланец следует в максимальной степени выделить из общей продукции сланцевых шахт и разрезов для переработки его (в обогащенном или необогащенном виде) в генераторах, оставляя только мелкозернистый отсеб для получения электроэнергии и для использования в УТТ [8].

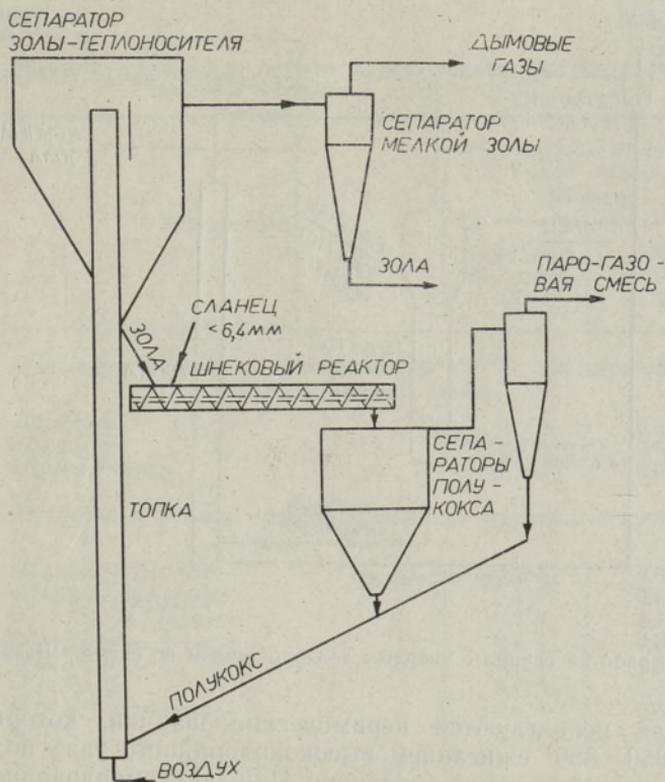


Рис. 5. Переработка сланца с твердым теплоносителем по схеме «Лурги-Рургаз».

Зарубежные УТТ для переработки мелкозернистого сланца

УТТ, основывающиеся на схемах «Лурги-Рургаз» и «Шеврон СТБ», используют в качестве теплоносителя собственную золу сланцев, как и «Галотер» (УТТ-500 и УТТ-3000) в СССР, и работают примерно в таких же температурных режимах (в реакторе 480—530 °С; теплоноситель 600—820 °С). Это маломощные пилотные установки: «Лурги-Рургаз» пропускной способностью 11 т сланца в сутки и «Шеврон СТБ» (в Калифорнии) — только 1 т в сутки; последняя дополнена физической моделью реторты (реактора) пропускной способностью 320 т в сутки [9, 10]. Упрощенные схемы этих установок представлены на рис. 5 и 6. В отличие от «Галотера», имеющего барабанный реактор, установка «Лурги-Рургаз» имеет шнековый реактор, а «Шеврон СТБ» — реактор с кипящим слоем. Твердый остаток при переработке карбонатных сланцев США в этих установках представляет собой золу с небольшим содержанием горючих (0,2—0,7% углерода). Выход смолы при этом практически равен выходу смолы в лабораторной алюминиевой реторте ($100 \pm 3\%$), т. е. полностью реализуется лабораторный потенциал [9, 10]. Основные опыты были проведены с колорадскими сланцами: выход смолы 8,4—10,5% по Фишеру и размеры кусков сланца не более 6,4 мм.

«Тоско II» — крупная опытно-промышленная установка, сооруженная в долине Парашют Крик (США, штат Колорадо) недалеко от строительной площадки проектируемого предприятия «Колони». Суточная пропускная способность «Тоско II» составляет 1000 шорт тон (907 т) колорадского сланца размерами кусков 0—13 мм. Схема установки по [11] приведена на рис. 7. В отличие от других УТТ, в «Тоско II» в качестве

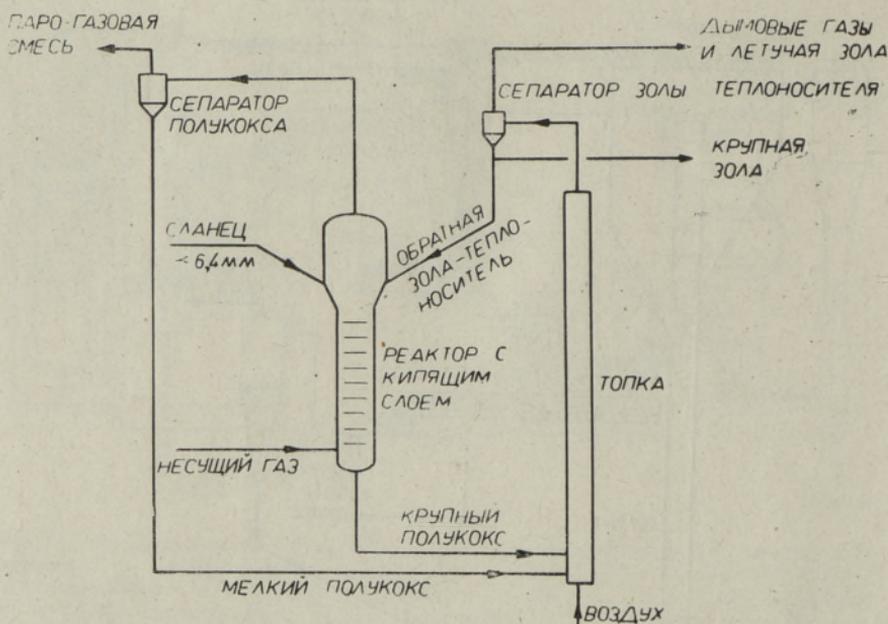


Рис. 6. Переработка сланца с твердым теплоносителем по схеме «Шеврон СТБ».

теплоносителя используются керамические шарики, которые нагреваются до $650\text{--}850^\circ$ сжиганием высококалорийного газа полукоксования. Отработанный сланец — полукокк. При зарекомендованном режиме работы выход смолы из колорадского сланца составлял 13,6% (выход смолы в алюминиевой реторте 14,6%) или 93% лабораторного потенциала.

Преимуществом «Тоско II» является химический нейтральный тепло-

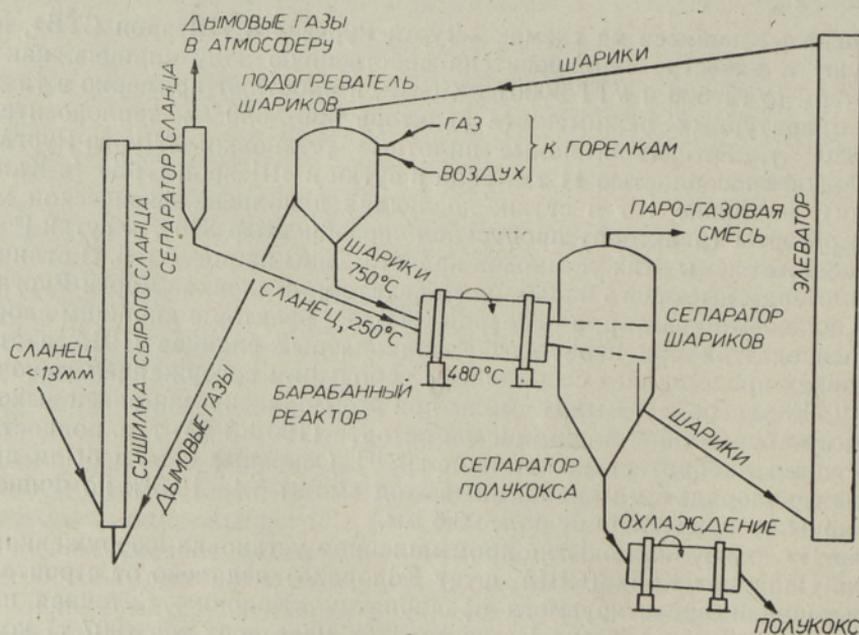


Рис. 7. Схема установки «Тоско II».

Энергетический к.п.д. добычи и переработки сланцев с высшей теплотой сгорания 5 МДж/кг [4, 12]

Установка	Месторождение сланца и выход смолы по Фишеру	
	Тимахдит (Марокко), 6,2%	Юта (США), 9,3%
Установки с твердым теплоносителем (УТТ) для переработки мелкозернистого сланца		
«Галотер»	0,478	0,607
«Тоско II»	0,408	0,623
«Лурги-Рургаз»	0,507	0,665
Установки с газовым теплоносителем для переработки кускового сланца		
«Парахо» (директ)	0,464	0,630
«Парахо» (индирект)	0,439	0,606
«Супирнор» (директ)	0,459	0,611
«Петросикс»	0,419	0,602
«Квивитер»	0,410	0,527
«Юнион Б»	0,415	0,617
НТУ (Т ³ -установка)	0,477	0,637
ВВГ —	0,476	0,619

носитель, так как компоненты золы в определенных условиях могут реагировать с продуктами термического разложения керогена. В результате сжигания собственного газа для нагревания шарикового теплоносителя и выдачи отработанного сланца в виде полукокса с высоким содержанием органики энергетический к.п.д. установки «Тоско II» невысок, особенно при переработке сланцев с относительно небольшим выходом смолы из керогена, характеризующихся более высоким содержанием углерода в остаточном полукоксе. Это видно из табл. 3, где на основе расчетов фирмы «Сайенс эпликейшнс» [4, 12] приведены значения к.п.д. разных установок термической переработки сланцев с учетом собственных энергетических нужд при добыче, транспортировке и переработке сланцев и удалении отработанного сланца.

Зарубежные установки с газовым теплоносителем для переработки кускового сланца (поверхностные)

Генератор-реторта «Парахо» установлен вблизи г. Райфл (штат Колорадо, США), его суточная пропускная способность 250 шорт тон (227 т) колорадского сланца размерами кусков 9,5—76 мм. Установка может быть пущена по двум схемам: со сжиганием полукокса в газификаторе (директ) или получением тепла путем сжигания газа полукоксования (по схеме индирект, рис. 8). При переработке колорадского сланца (выход смолы, по Фишеру, 10,7%) по схеме директ выделяется около 230 м³/т генераторного газа (4,35 МДж/м³), а твердый остаток получается в виде золы с минимальным содержанием углерода (порядка 0,2%). По схеме индирект получается около 16 м³/т высококалорийного газа (33 МДж/м³) и полукокс. Температура в зоне полукоксования составляет 480—540°. Основные преимущества установки «Парахо» — это простейшая конструкция без движущихся элементов и с небольшим

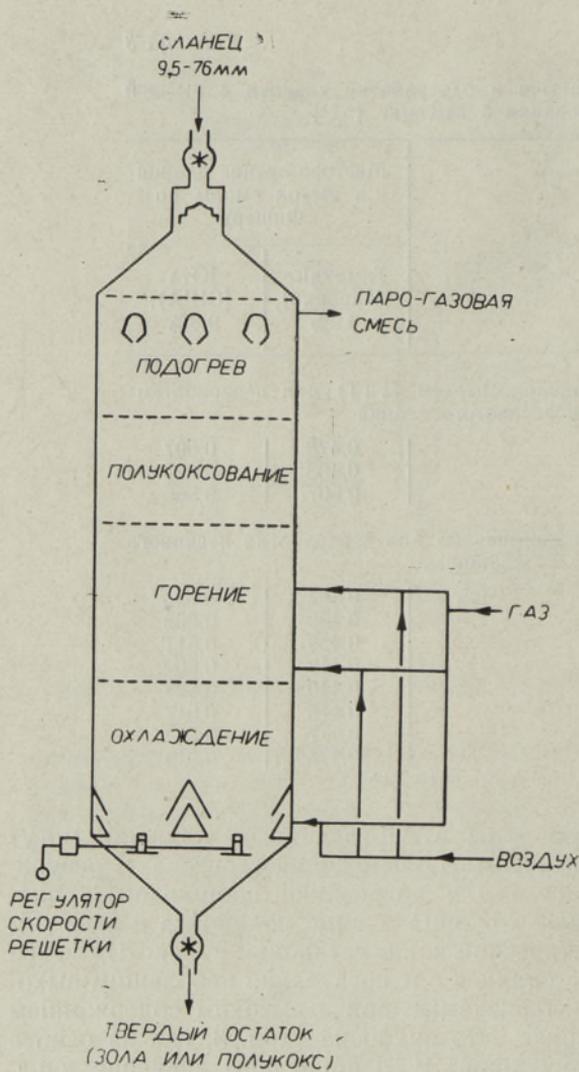


Рис. 8. Схема генератора-реторты «Парахо».

расходом воды (воду используют только для предотвращения пыли при добыче сланца, для орошения рекультивируемой поверхности золоотвала и для нужд заводской инфраструктуры).

Реторта «Петросикс» в штате Парана (Бразилия) перерабатывает сланец формации Ирати с выходом смолы, по Фишеру, в среднем 7%. По пропускной способности сланца (2200 т в сутки) и выходу смолы (около 150 т в сутки) реторта является самой крупной сланцеперерабатывающей установкой за рубежом (рис. 9). Реторта работает по схеме индирект с выходом высококалорийного газа около $18 \text{ м}^3/\text{т}$ и твердым остатком в виде полукокса. Диаметр шахты полукоксования около 11 м, поперечное сечение около 95 м^2 , размеры кусков сланца 0—152 мм. Своеобразие схемы «Петросикс» составляет теплообменник, где газ-теплоноситель нагревают

до 650° .

В установках «Парахо» и «Петросикс», как и в отечественных установках газогенераторного типа (генераторы с центральным вводом теплоносителя и генераторы «Ленгипрогаза» мощностью 100—150 т сланца в сутки), и в генераторах фушуньского типа в КНР мощностью 200 т сланца в сутки, потоки сланца (сверху вниз) и теплоносителя (снизу вверх) встречные.

В генераторе-реторте «Супириор» потоки сланца и теплоносителя поперечные. Установка в штате Колорадо (США) производительностью 227 т сланца в сутки (размеры кусков сланца 6,4—102 мм) может работать в режимах директ (рис. 10) или индирект. Горизонтальное движение слоя обеспечивается вращающейся дисковой (карусельной) колосниковой решеткой (на рис. 10 — схематическая прямая), которая регулируется скоростью движения и позонным дутьем. Аналогичные решетки применяются в печах для обжига окатышей из порошковых железных руд. Позонное секционирование решетки по ходу ее вращения позволяет создать на решетке зоны полукоксования, газификации полукокса и охлаждения обработанного сланца. Недостаток реторты «Супириор» —

Рис. 9. Схема реторты «Петросикс».

дороговизна, сложность и тяжелые температурные условия работы механической части решетки.

Реторта «Юнион Б» (штат Колорадо, США) построена также по принципу противотока сланца и теплоносителя (газ полукоксования нагревается вне реактора в специальном теплообменнике), причем сланец движется снизу вверх при помощи специального толкателя («рок-памп»), размещенного в нижней части установки (рис. 11). Опытная установка маломощна — пропускная способность 6 т сланца в сутки, размеры кусков сланца 3—50 мм, отработанный сланец — полукокк, однако возможны его газификация и дожигание в отдельной камере. При переработке колорадского сланца с выходом смолы, по Фишеру, 13,3% выход газа теплотой сгорания 36,5 МДж/кг составлял 23,8 м³/т. По [16], на участке Лонг Ридж в долине Парашют Крик в 1983 г. предусмотрен пуск крупной реторты мощностью 12 500 шорт тон (11 300 т) сланца в сутки с выходом 1390 т сырой смолы (12%). Высота этой реторты около 60 м, диаметр поршня-толкателя 3 м.

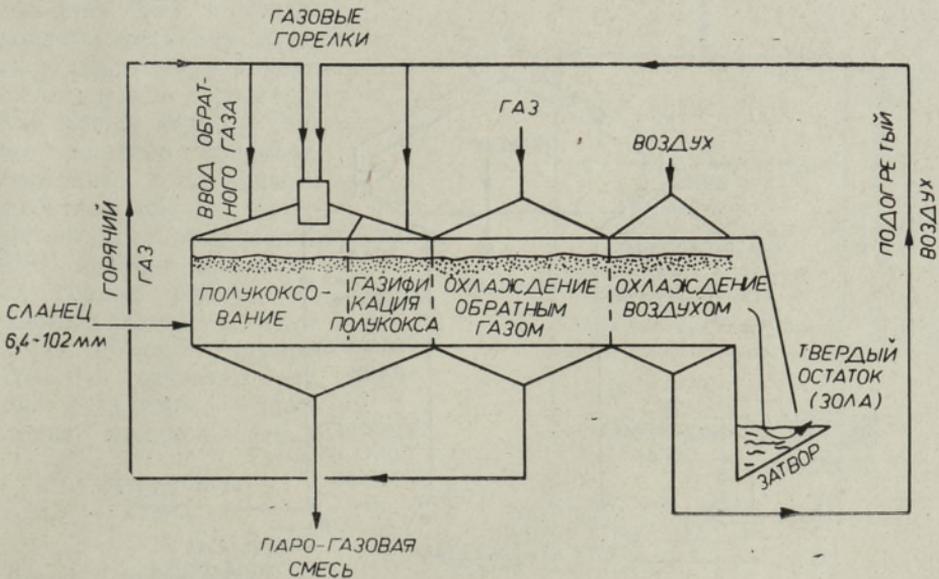
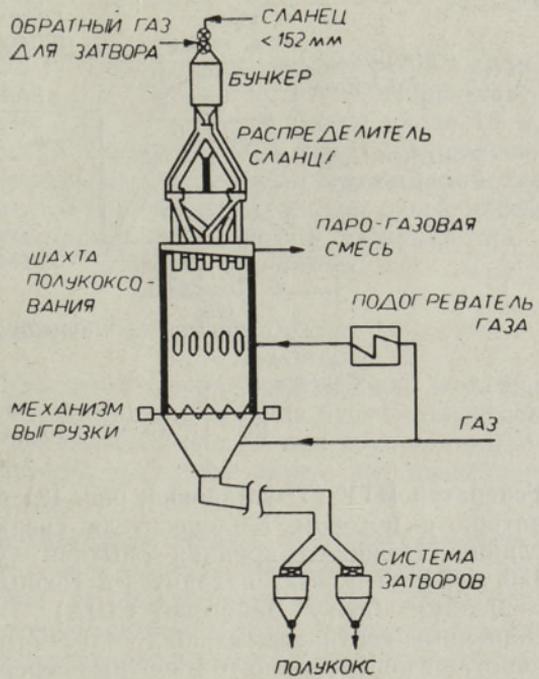


Рис. 10. Схема генератора-реторты «Супериор» при работе по схеме директ.

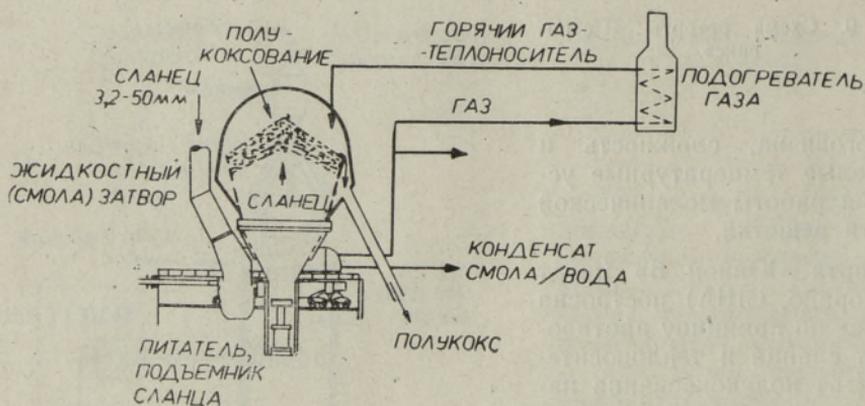


Рис. 11. Схема реторты «Юнион Б».

Генератор НТУ (Т³-установка, рис. 12) работает по принципу газогенератора с потоком теплоносителя сверху вниз в неподвижной шихте сланца. Наиболее крупная опытная установка производительностью 150 т сланца в сутки находится в Технологическом центре энергетики в г. Лерами (штат Вайоминг, США). Генератор, состоящий из двух спаренных вертикальных шахт (диаметр 3,5 и высота 13,7 м). Шахты работают попеременно то в режиме переработки сланца, то охлаждения-удаления золы с одновременной загрузкой свежим сланцем (крупность кусков 13—152 мм) и его подогревом за счет тепла золы. Переработка сланца проводится в газогенераторном режиме с паро-воздушным дутьем за счет тепла, получаемого от горения отработанного сланца-полукокса, с выходом большого количества низкокалорийного генераторного газа. Например, при переработке сланца штата Юта (выход смолы, по Фишеру, 9,3%) выход генераторного газа теплотой сгорания 2,75 МДж/м³ составляет 342 м³/т. Переработка начинается с зажигания сланца сверху, затем распространением фронта горения полукокса и зоны полукоксования

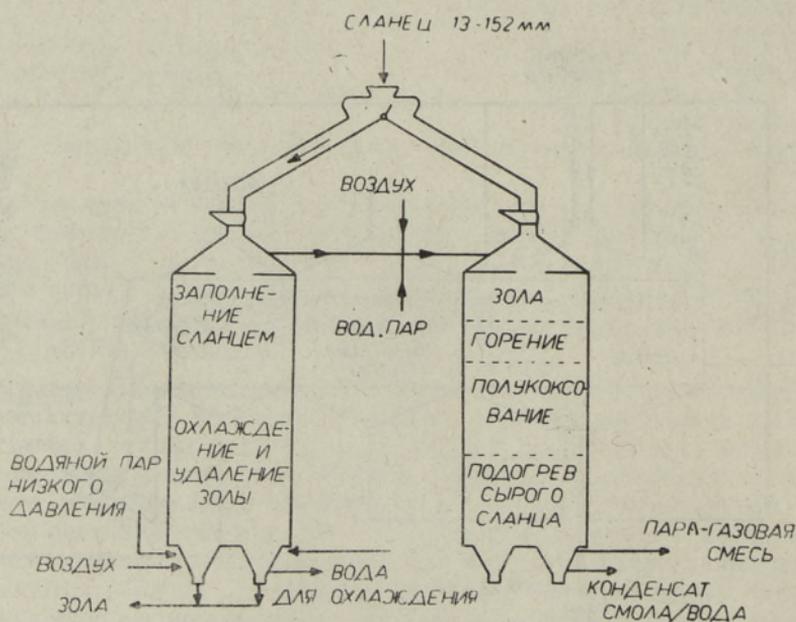


Рис. 12. Схема Т³-установки.

сверху вниз с одновременным сбором смолы, ее паров и газа из нижней части генератора.

Генераторы типа «Фушунь» (КНР) [13] производительностью 200 т сланца в сутки (размеры кусков сланца 9,5—70 мм). Это генераторы шахтного типа с поперечным сечением 8,12 м², высотой шахты около 10 м, работающие при встречных потоках сланца (сверху вниз) и теплоносителя (продукты сгорания и газификации полукокса). При переработке сланца, выход смолы из которого 6,5% и теплота сгорания сухой массы 6,15 МДж/кг, получается генераторный газ теплотой сгорания 3,3—4,2 МДж/кг.

Внутрипластовая переработка

Анализ разных способов внутрипластовой переработки выходит за рамки данного обзора. Большинство их вплоть до 90-х годов будет относиться к малоперспективным. Однако исключение составляют крупные вертикальные внутрипластовые генераторы, известные также под названием «модифицированная in situ реторта».

Вертикальный внутрипластовый генератор (ВВГ) (рис. 13) находится в настоящее время в стадии крупного промышленного внедрения как основная технологическая ячейка на строящемся заводе «Катидрал Блафс» в Колорадо с целевым производством ИЖТ 4,8 млн. т в год [14]. ВВГ является аналогом НТУ-генераторов, но значительно крупнее последних. Скорость продвижения фронта горения (сверху вниз) в крупных ВВГ составляет около 0,3 м (1 фут) в сутки. Опытные ВВГ № 7 и 8 фирмы «Оксидентал ойл шейл» сооружены в Лоуган Ваше (Колорадо). Размеры такого ВВГ следующие: поперечное сечение — квадрат площадью 2530 м² и высота 73 м (соответствует полной мощности сланцевого пласта в данном месте). Производительность одной камеры составляет около 750 м³ или приблизительно 1,3—1,4 тыс. т переработанного сланца в сутки. Задача опытных ВВГ — отработка режима одновременного действия двух соседних ВВГ и исследование механики грунта в целях определения оптимальных расстояний между ними, а также решение вопросов, связанных с взрывными работами при их сооружении. Для сооружения ВВГ вначале проводятся горные работы по выемке сланца — около 30% объема камеры ВВГ — (участки «а», рис. 14), затем — дробление целиков («б»),

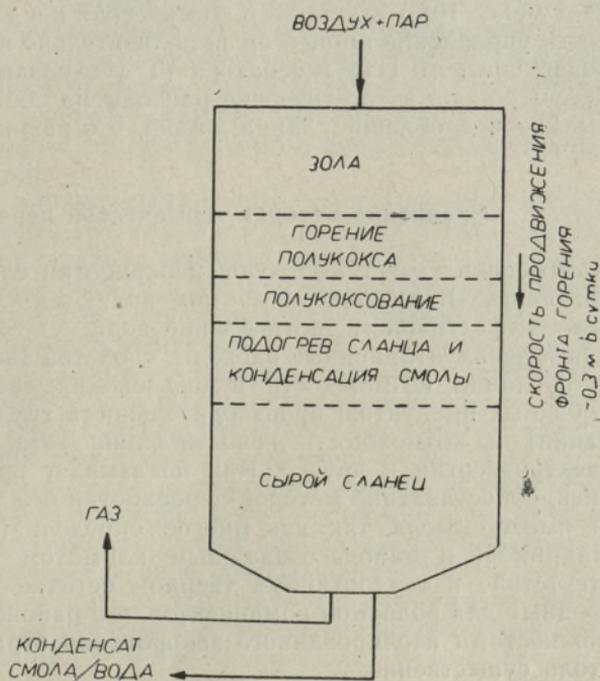


Рис. 13. Принцип работы вертикального внутрипластового генератора (ВВГ).

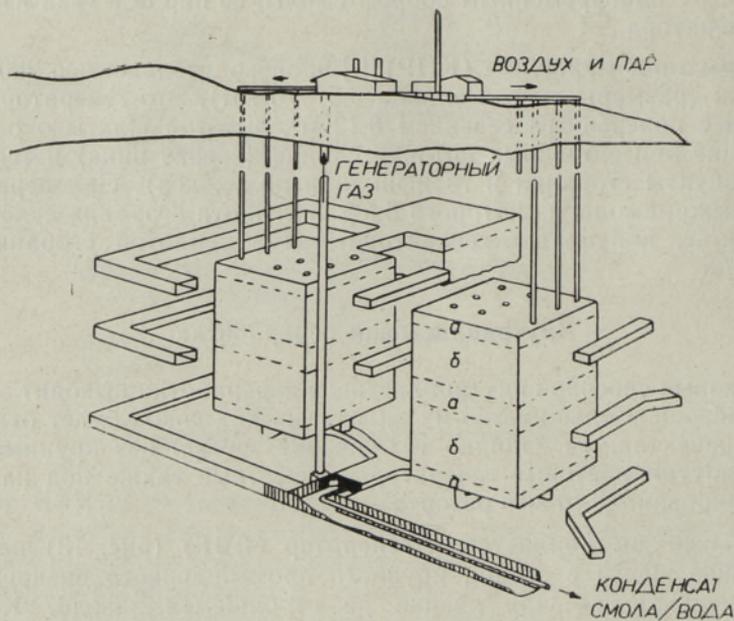


Рис. 14. Схема опытных ВВГ фирмы «Оксидентал ойл шейл»: а — пространства, очищаемые горными работами; б — массивы, перерабатываемые после взрыва внутри пласта.

рис. 14) запрограммированной серией взрывов. Вынутый на поверхность сланец перерабатывается в поверхностных установках. Соотношение производства ИЖТ на ВВГ (60%) и поверхностных установках (40%) в проекте «Катидрал Блафс» определено тем, что средние участки камер расположены в зоне более богатого сланца, выход смолы из которого около 12,7%, а средний выход смолы из сланца на участках «б» составляет менее 10%. Кроме того, химический к.п.д. крупных ВВГ из-за сложности управления процессом приблизительно на 8—10% ниже, чем к.п.д. поверхностного НТУ-генератора (Т³-установки). По данным табл. 3, где учтены также энергетические расходы на собственные нужды, включая выемку и дробление сланца, видно, что разница в к.п.д. не так велика.

Сравнение методов термической переработки сланцев

Для оценки качества способа переработки сланцев имеется множество критериев. Важнейшими из них являются: химическая и энергетическая эффективность, потребление воды, удельные капитальные вложения и эксплуатационные расходы, свойства твердого остатка отработанного сланца, возможность использования твердых остатков и других побочных продуктов, производительность труда, качество (теплота сгорания) и возможность использования газа, возможность выработки электроэнергии и другие. Как показывает приведенный список критериев, сопоставление методов переработки без учета конкретных условий не имеет смысла, так как многое определяется местными условиями. Например, в районе с влажным климатом большое значение имеет отсутствие в отработанном твердом остатке сланца водорастворимых, вредных для водоемов компонентов, а в районе с сухим климатом и возможностями изолированного захоронения отработанного сланца это не столь существенно.

Относительная стоимость крупного сланцеперерабатывающего предприятия (шахта и завод) при равной мощности в зависимости от типа установки, используемой для переработки (колорадский сланец, по данным [14])

Тип установки	Базисная сметная стоимость *	Тип установки	Стоимость с учетом технологического риска *	Средние по установкам для кускового или мелкозернистого сланца *
---------------	------------------------------	---------------	---	--

С установками для переработки кускового сланца

«Юнион Б»	1	«Петросикс»	1	1
«Супириор»	1,01	«Парахо»	1,04—1,16	
«Петросикс»	1,05	НТУ	1,14	
«Парахо»	1,09	«Юнион Б»	1,21	
НТУ	1,21	«Супириор»	1,22	

Установки с твердым теплоносителем (УТТ) для переработки мелкозернистого сланца

«Лурги-Рургаз»	1,23	«Тоско II»	1,39	1,26—1,28
«Тоско II»	1,47	«Лурги-Рургаз»	1,49	

* Стоимость наиболее дешевого варианта в графе принята за единицу.

В табл. 3 приведены энергетические к.п.д. разных способов переработки для двух разновидностей низкосортного сланца с равной теплотой сгорания (5 МДж/кг), но с различными выходами смолы (тимахдит 6,2 и сланец штата Юта 9,3%). Бросается в глаза значительно более низкий к.п.д. установок, не использующих теплоту сгорания полукокса, особенно при переработке сланца тимахдит. К.п.д. установок «Тоско II», «Петросикс», «Юнион Б», «Парахо-индирект» и «Кивитер», твердым остатком в которых является полукокс, равен 0,408—0,419, к.п.д. установок, твердым остатком которых является зола, равен 0,459—0,507. При обработке сланцев с более высоким выходом смолы из керогена эта разница в к.п.д. уменьшается.

На к.п.д. существенно влияют собственные энергетические затраты при добыче, дроблении и переработке сланца. Удельный расход электроэнергии для этих целей при разных методах переработки составляет 39,3—138,5 кВт·ч/т [12]; или, с учетом к.п.д. при выработке электроэнергии, — 0,4—1,5 МДж/кг (на 1 кг сланца теплотой сгорания 5 МДж/кг, или 8—30%). Например, энергетические к.п.д. ВВГ и Т³-установки при переработке марокканского сланца (тимахдит) с учетом собственных энергетических нужд равны (0,476 и 0,477), а химические к.п.д. существенно расходятся (ВВГ 0,558 и Т³-установки 0,608), так как собственный расход ВВГ составляет 39,3 кВт·ч/т, а Т³-установки — 62,7 кВт·ч/т.

В табл. 4 приведены относительные стоимости зарубежных проектов сланцеперерабатывающих предприятий, с учетом добычи и подготовки сланца, причем за единицу стоимости принят наиболее дешевый вариант. Технологический риск определен в виде коэффициентов 1,25, или 1,4 и 1,6 к сметной стоимости в случае масштабного увеличения нового проекта по мощности (по сравнению с испытанным прототипом) соответственно менее 1 порядка или 1—2 и 2—3 порядков.

Аналогичные приведенным в табл. 4 результаты расчетов получаются также при сопоставлении эксплуатационных расходов [15]. Данные табл. 4 согласуются с выводами [8], подтверждая целесообразность использования кускового сланца для переработки в более дешевых установках и его отсевов — в сложных и более дорогих УТТ.

В дополнение к ранее опубликованному материалу следует отметить некоторые весьма существенные изменения на нефтяном рынке. По сообщениям газет во второй половине 1981 г. западные страны, создав запасы нефти, резко сократили ее закупку. Это вынудило страны ОПЕК в 1982 г. понизить цены на нефть более чем на 25%. В этой ситуации нефтяные монополии снова начинают считать невыгодной для себя разработку ИЖТ. Например, фирма «Экссон», по сообщению газет, решила отказаться от участия в проекте «Колони», а проект «Колони» и некоторые другие крупные проекты по извлечению из сланцев ИЖТ отложены на неопределенный срок или даже аннулированы. По [16], проект «Лонг Ридж» фирмы «Юнион ойл» — единственный реальный вариант производства из сланцев ИЖТ в ближайшие годы в США.

Выводы

1. В СССР сооружены производительные установки термической переработки сланцев с газовым теплоносителем для переработки кускового сланца и с твердым теплоносителем для переработки сланцевой мелочи.
2. Данные об относительной стоимости сланцепереработки (включая добычу и подготовку сланца), полученные на основе анализа работ опытных и опытно-промышленных установок, показывают, что удельные капитальные вложения в добычу сланца и переработку на получение сланцевой смолы при переработке кускового сланца на 20—25% ниже, чем при переработке сланцевой мелочи в установках с твердым теплоносителем. Отсюда вытекает целесообразность выделения кускового сланца из общей добычи шахт или разрезов для переработки (даже при наличии крупных потребителей) пылевидного или мелкого дробленного сланца.
3. С учетом разнообразия сланцевых месторождений СССР для дальнейшего изучения представляют интерес не только отечественные разработки сланцепереработки и результаты их испытаний, но и зарубежный опыт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Australian Mining, 1981, August, 12.
2. Ефимов В. М., Дойлов С. К., Кундель Х. А., Соо М. О., Пурре Н. А. Сравнительная характеристика и опытная переработка горючих сланцев различных месторождений. — Тр. НИИсланцев. Вып. 22. Таллин, 1978, 27—51.
3. Ефимов В. М., Дойлов С. К., Раад Х. Э., Лезнер Р. А. О технических возможностях и особенностях полукоксования бедных органической массой горючих сланцев. — Тр. НИИсланцев. Вып. 22. Таллин, 1978, 52—73.
4. Bouchta, R., Berrada, S. Development of T³-process in Marocco, Science Applications Inc. USA. — 6th IASIA Res. Conf. Golden (USA), 1981.
5. Southern Pacific Petroleum NL. 1980. Ann. Rep. Sydney, 1981.
6. Тягунов Б. И., Панов В. И., Стельмах Г. П. Энерготехнологическое использование горючих сланцев. — Энергетическое строительство, 1980, № 4, 28—30.
7. Yefimov, V. M., Volkov, T. M., Petukhov, E. F., Rooks, I. K. The thermal processing of lump oil shale: The Kiviter process. — Oil shale processing technology, East Brunswick, New Jersey, 1982, 67—81.
8. Аарна А. Я. О направлениях использования прибалтийских горючих сланцев. — Горючие сланцы, 1981, № 5, 1—6.
9. Weiss, H. J. The retorting of oil shale by the Lurge Ruhrgas Process. — 6th IASIA Res. Conf. Golden (USA), 1981.

10. Tamm, P. W., Bertelsen, C. A., Handel, G. M., Spars, B. G., Wallmann, P. H. The Chevron STB Oil Shale Retort. Washington, 1981.
11. Piper, E. M. State of the art: oil-shale process technology. — 6th IIASA Res. Conf. Golden (USA), 1981.
12. Hall, R. G. Utilization of oil shale fines and retort product gas for power generation and SO₂ emission control, Science Applications Inc., USA — 6th IIASA Res. Conf. Golden (USA), 1981.
13. Эпштейн С. Л. Полукоксование горючих сланцев в Китайской Народной Республике. — Горючие сланцы, 1961, № 1, 74—87.
14. Dermott, W. F. Development of a commercial oil shale project. — 6th IIASA Res. Conf. Golden (USA), 1981.
15. Heydari Mir, N. Selection of appropriate technology for oil shale development based on a comparative analysis of surface retorting processes. — 6th IIASA Res. Conf. Golden (USA), 1981.
16. Williams, B. Union's oil-shale plant still due to start-up next year. — Oil and Gas Journal, 1982, 80, N 26, 71—75.

Академия наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
10/X 1982

I. ÕPIK

TÄHTSAMAD PÕLEVKIVI TERMILISE TÖÖTLEMISE TÖÖSTUSLIKUD JA DEMONSTRATSIOONKATSESEADMED

On esitatud skeeme ja andmeid 12 seadme kohta: 1) tööstuslikud seadmed: põlevkivigeneraator läbilaskevõimega 1000 t rikastatud põlevkivi ööpäevas, tahke soojuskandjaga seade UTT-3000 (mõlemad NSVL, sealh. ENSV), «Petrosix» (Brasiilia) ja «Fushun» (HRV); 2) katseseadmed: «Tosco II», «Paraho», «Superior», «Union-B», «Chevron-STB», NTU (T³-protsess) ja «Oxy-MIS» (kõik USA) ning «Lurgi-Ruhrgas» (SFV). Võrreldud on õlisaagist, kasutegureid ja seadme rajamise kulusid. Mitmes asutuses tehtud arvutused näitavad, et summaarsed erikapitaalmahutused põlevkiviõli tootmiseks (kaevanduste, rikastus- ja purustusseadmete ning õlivabrikute ehitamine) on tükkpõlevkivi kasutamise korral nii NSV Liidus kui ka väljaspool 20—25% madalamad kui peenpõlevkivi töötlemisel. On järeldatud, et ka suurte peenpõlevkivitarbijate olemasolu korral (elektrijaamad, UTT) võib osutada otstarbekohaseks tükkpõlevkivi välja sorteerida ja toota sellest õli odavates utteseadmetes.

I. ÕPIK

MAJOR INDUSTRIAL AND DEMONSTRATION RETORTS FOR THERMAL TREATMENT OF OIL SHALE

Schemes and data concerning 12 major industrial-scale and demonstration-scale retorts and processes for the thermal treatment of oil shale are described and compared; the «Kiviter» retort with a daily production of crude shale oil of 1300 bbl (180 metric tons) and the «Galoter» retorting system (two retorts) with a daily production of 5600 bbl (776 metric tons) of oil (both in the USSR), retorts «Tosco II», «Paraho», «Superior», «Union-B», «Chevron STB», NTU (T³-process) and «Oxy-MIS» (all in the USA), «Lurgi-Ruhrgas» (FRG), «Petrosix» (Brazil) and «Fushun» (China).

The energy and chemical efficiency and capital cost of the processing systems are likewise compared. Calculations made at several institutes show that the summary capital investments into a complete oil shale mining, preparing and retorting project for processing coarse shale are 20—25% lower than the investments for a similar project of processing shale fines. It is concluded that, even in the presence of large-scale consumers of oil shale fines, the separation and retorting of coarse shale by special cheap equipments could be recommended.