

## ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ НАГРЕВА СЛАНЦА-КУКЕРСИТА ПРИ ОДНОСТОРОННЕМ ПОДВОДЕ ТЕПЛА \*

М. Я. ГУБЕРГРИЦ,  
кандидат технических наук

К. А. КУИВ

Осуществление процесса термической переработки сланца при любом его технологическом оформлении неразрывно связано с изменением характеристики температурного поля в одиночном куске либо на некотором участке слоя кускового (или зернистого) материала в зависимости от времени. Изучению этого вопроса посвящены лишь немногочисленные работы, связанные главным образом с характеристикой отдельных технологических методов переработки сланца [2, 3, 6, 7].

В настоящей статье излагаются и обсуждаются результаты экспериментального изучения динамики изменения теплового поля в куске и слое зернистого сланца при линейном распространении теплового потока. Практически задача решается путем воспроизведения изменений температурного поля в полуограниченном стержне с односторонним подводом тепла [1, 5]. При этом тепловой поток распространяется по нормали к изотермической греющей поверхности. Подобная постановка задачи позволяет изучить в самом общем виде динамику нагрева изучаемого образца. Полученные общие закономерности могут быть распространены на ряд частных случаев без внесения существенных погрешностей.

Практическое применение полученных результатов возможно, например, для случая изучения теплоотдачи при подготовке пласта сланца к бесшахтной подземной газификации.

Методика исследования и описание экспериментальной установки подробно изложены в предыдущем сообщении [4]. Характеристика температурного поля рассматривается при двух тепловых режимах — неустановившемся и стационарном (точнее, квазистационарном, когда изменение фиксируемой температуры во времени настолько незначительно, что им можно пренебречь).

### Динамика нагрева при нестационарном тепловом режиме

В настоящем разделе работы рассматривается динамика изменения температуры как в одиночном куске сланца, так и в зернистом слое при различном температурном потенциале греющей поверхности и линейном характере распространения теплового потока.

Динамика одностороннего нагрева куска сланца заданной формы (вытянутый параллелепипед) изучена при распространении теплового потока по нормали к направлению слоистости. Ход изменения температуры во времени в точках, удаленных на различные расстояния от греющей поверхности, представлен на рис. 1. Различные кривые в одном и том же пучке (т. е. для данного значения  $x$ ) соответствуют различным уровням температурного потенциала греющей поверхности.

\* Работа проведена в секторе технологии термической переработки сланца Института химии АН ЭССР.

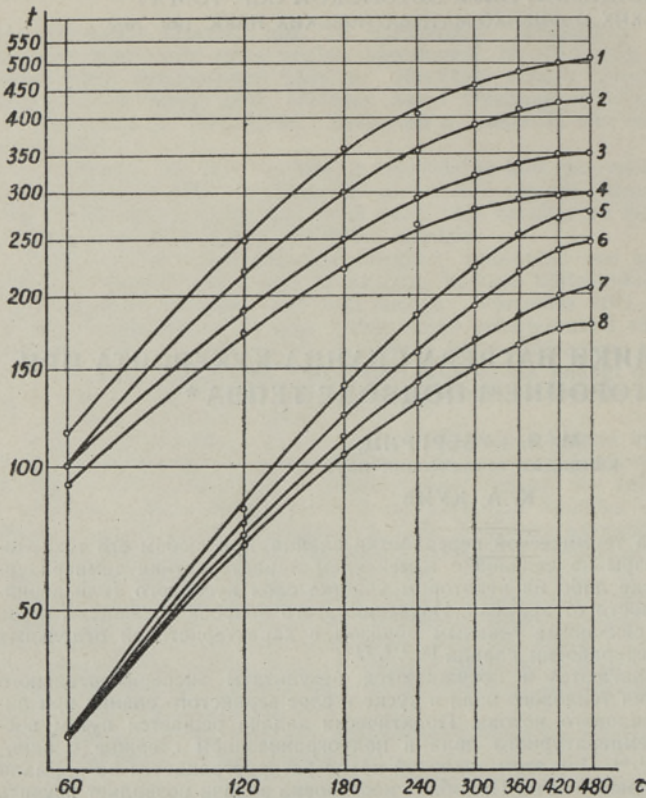
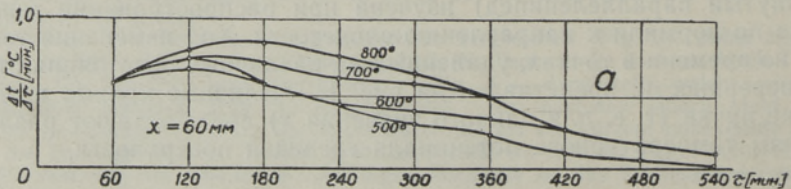


Рис. 1.

Изменение температуры во времени в целике при разных температурах греющей поверхности. При  $x = 20$  мм: 1 — 800°; 2 — 700°; 3 — 600°; 4 — 500°. При  $x = 60$  мм: 5 — 800°; 6 — 700°; 7 — 600°; 8 — 500°.

Одним из наиболее существенных вопросов при изучении динамики нагрева куска является определение скорости нагрева материала во времени на различных расстояниях от его поверхности. На рис. 2 (а и б) графически представлены результаты изучения этого вопроса. На расстоянии  $x = 20$  мм от греющей поверхности величина  $\Delta t / \Delta \tau$  имеет тенденцию к снижению во времени до предела, соответствующего стационарному состоянию. Сравнение кривых для различных значений  $x$  (20 и 60 мм) свидетельствует об уменьшении абсолютных значений скорости нагрева с увеличением расстояния от поверхности куска. При этом на известной глубине скорость нагрева изменяется во времени весьма незначительно (рис. 2б).

На характере описанных кривых мало отражается эффект испарения влаги и миграции ее вглубь куска, так как в данном случае иссле-

Рис. 2а. Скорость нагрева сланцевого целика при  $x = 60$  мм.

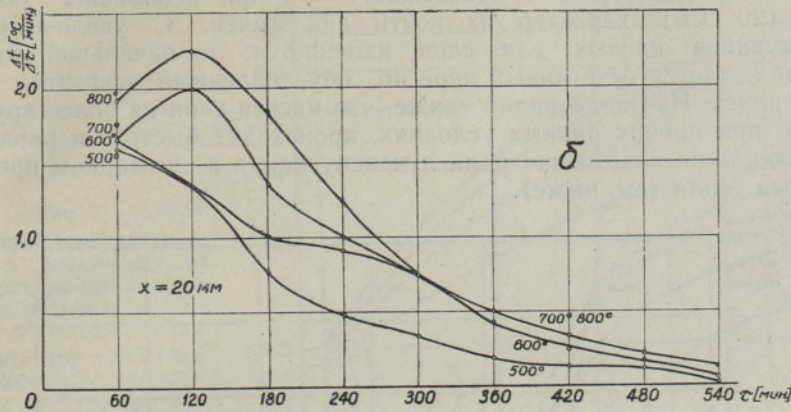


Рис. 26. Скорость нагрева сланцевого целика при  $x = 20$  мм.

дованию подвергались образцы воздушно-сухого материала ( $W_p = 1,0 - 1,4\%$ ). При нагреве кускового сланца влияние процесса газовой выделению на характеристику температурного поля проявляется однозначно, так как эвакуация парогазовой смеси практически осуществляется через пронцаемый слой переработанного сланца (в противотоке к направлению распространения теплового потока). Основным фактором, определяющим ход кривых на рис. 1 и 2, является температура греющей поверхности.

При изучении динамики нагрева слоя зернистого сланца число возможных воздействующих факторов увеличивается. Исследованию были подвергнуты образцы зернистого сланца различной крупности (1—4, 4—7 и 7—12 мм) и влажности (4 и 10%) при различных способах эвакуации продуктов термического разложения — в противотоке и прямотоке.

На рис. 3 представлены кривые изменения температуры во времени для указанных трех классов крупности при эвакуации парогазовых продуктов в противотоке (температура греющей поверхности  $800^\circ$ ,  $W_p \approx 10\%$ ). Сопостав-

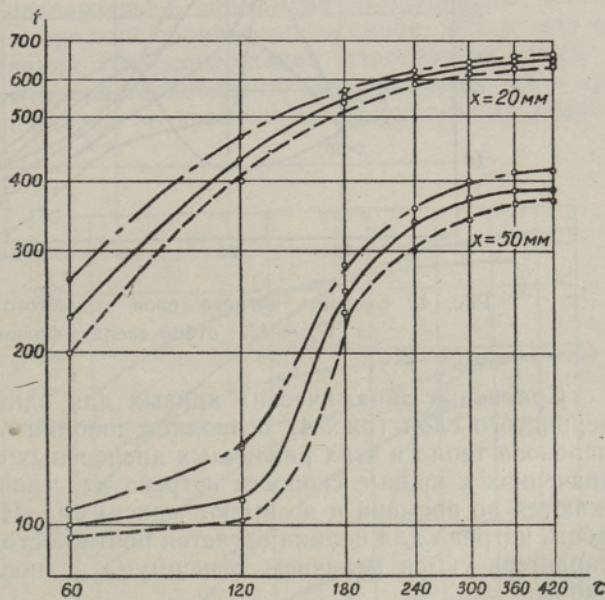


Рис. 3. Изменение температуры во времени в слое зернистого сланца в зависимости от крупности зерен ( $t_{гр} = 800^\circ$ ;  $W_p \approx 10\%$ ; отбор сверху).

Условные обозначения:

- — фракция 1—4 мм; — — фракция 4—7 мм; - · - · — фракция 7—12 мм.

ление с кривыми рис. 1 показывает, что при небольших значениях  $x$  (20 мм) характер их почти аналогичен. С увеличением  $x$  конфигурация кривых для слоя изменяется; в начальной их части наблюдается отчетливый перегиб, обусловленный эффектом испарения влаги. Из рис. 3 видно также, что нагрев слоя из более крупных частиц, при прочих равных условиях, происходит быстрее и равномернее вследствие повышения роли лучеиспускания в суммарном процессе переноса тепла (см. ниже).

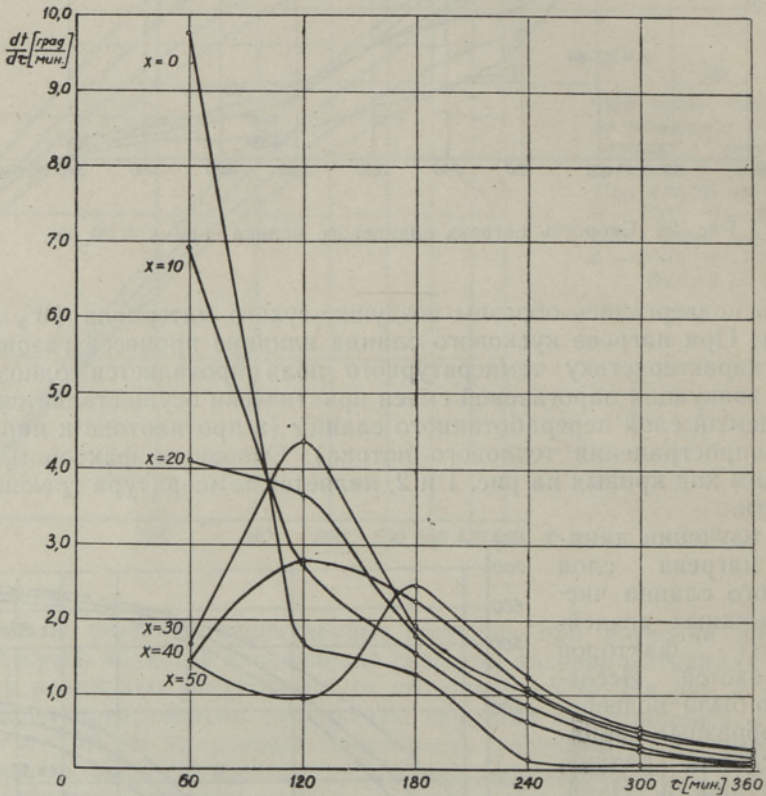


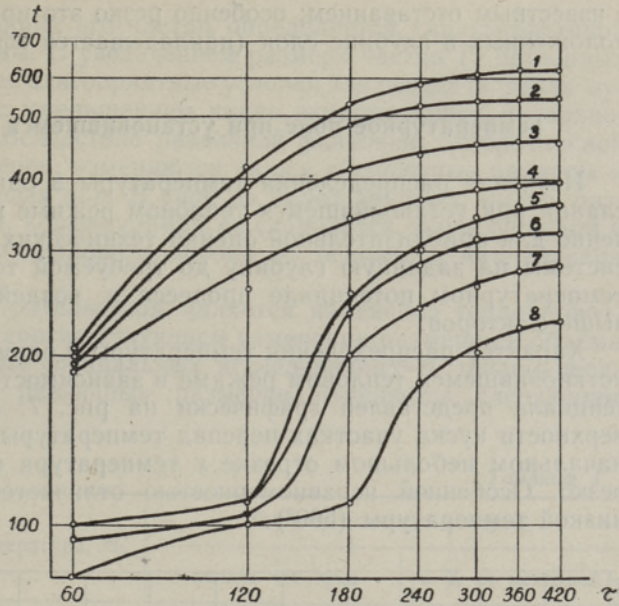
Рис. 4. Скорость нагрева слоя зернистого сланца ( $t_{гр} = 800^\circ$ ;  $W_p \approx 4\%$ ; отбор сверху; фракция 4—7 мм).

Сравнение динамических кривых для одиночного куска (рис. 2) и зернистого слоя (рис. 4) позволяет дополнить характеристику условий переноса тепла в этих различных дисперсных системах. При небольших значениях  $x$  кривые скорости нагрева для слоя сравнительно резко снижаются во времени и не имеют максимума. На известной глубине скорость нагрева для целика остается почти постоянной, а кривые для слоя характеризуются наличием максимума с последующим резким перегибом.

Влияние температурного потенциала на динамику нагрева в различных точках слоя отчетливо видно из рис. 5. Кривые этого рисунка отличаются друг от друга только пространственным расположением в системе координат, т. е. абсолютными значениями скорости нагрева. Причина этого явления заключается в усиливающейся роли передачи тепла лучеиспусканием с повышением температуры греющей поверхности.

Рис. 5.

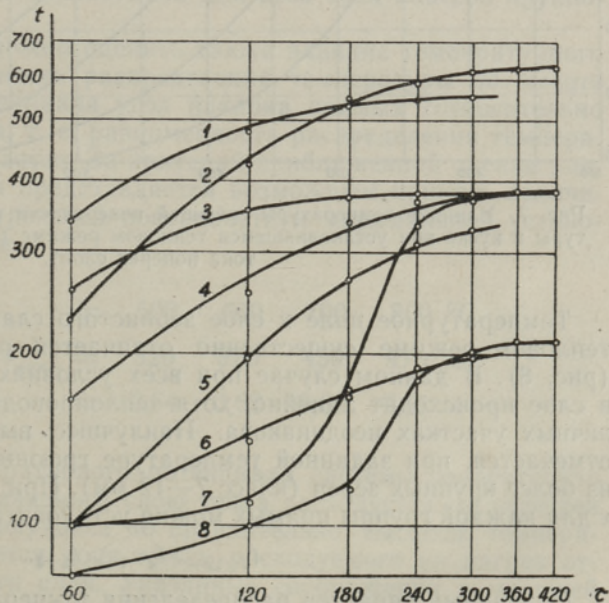
Изменение температуры в слое в зависимости от температуры греющей поверхности (фракция 4—7 мм;  $W_p \approx 10\%$ ; отбор сверху). При  $x = 20$  мм: 1 — 800°; 2 — 700°; 3 — 600°; 4 — 500°. При  $x = 50$  мм: 5 — 800°; 6 — 700°; 7 — 600°; 8 — 500°.



Кривые на рис. 6 дают представление о влиянии способа эвакуации парогазовой смеси на динамику нагрева зернистого сланца в слое. Неодинаковая их протяженность обусловлена тем, что при отборе продуктов термического разложения в прямотоке стационарное состояние достигается за более короткий промежуток времени, вследствие дополнительного использования теплосодержания парогазовой смеси за счет вынужденной конвективной теплоотдачи. При эвакуации ее в противотоке изменение температуры во времени происходит более резко и

Рис. 6

Влияние способа эвакуации парогазовой смеси на динамику нагрева зернистого слоя (фракция 4—7 мм;  $W_p \approx 10\%$ ). При  $t_{гр} = 800^\circ$  и  $500^\circ$  и  $x = 20$  мм: 1 и 3 — отбор снизу; 2 и 4 — отбор сверху. При  $t_{гр} = 800^\circ$  и  $500^\circ$  и  $x = 50$  мм: 5 и 6 — отбор снизу; 7 и 8 — отбор сверху.



с известным отставанием; особенно резко это проявляется в точках, расположенных в глубине слоя (накладывается эффект испарения влаги).

### Температурное поле при установившемся тепловом режиме

Изучение распределения температуры в одиночном куске или слое сланца при установившемся тепловом режиме имеет практическое значение для приблизительной оценки технических возможностей прогрева системы на заданную глубину до требуемой температуры при данном температурном потенциале процесса и воздействии ряда указанных выше факторов.

Характер распределения температуры в одиночном куске сланца при установившемся тепловом режиме в зависимости от температурного потенциала представлен графически на рис. 7. На близлежащих к поверхности куска участках перепад температуры относительно велик: на начальном небольшом отрезке  $x$  температура снижается сравнительно резко. Особенной неравномерностью отличается кривая для наиболее низкой температуры ( $500^\circ$ ).

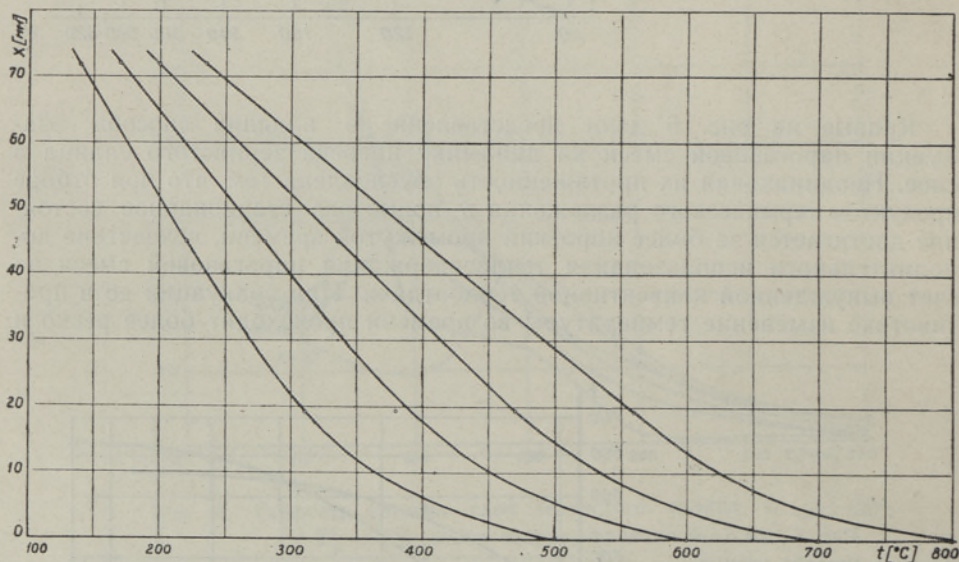


Рис. 7. Влияние температуры греющей поверхности на распределение температуры в куске при установившемся тепловом режиме (направление теплового потока поперек слоя).

Температурное поле в слое зернистого сланца при установившемся тепловом режиме существенно отличается от рассмотренного выше (рис. 8). В данном случае при всех условиях изменение температуры в слое происходит линейно, хотя теплопроводность материала на различных участках неодинакова. Наилучшее выравнивание температуры отмечается, при заданной температуре греющей поверхности, для слоя из более крупных зерен (класс 7—12 мм). При одном и том же значении  $x$  для каждой группы прямых можно установить четкую закономерность:

$$t_{7-12} > t_{4-7} > t_{1-4}.$$

Описанный характер распределения температуры в слое в зависимо-

сти от крупности слагающих его частиц определяется характеристикой слоя как дисперсной среды. С увеличением размера частиц (в изученных пределах) создаются более благоприятные условия для передачи тепла лучеиспусканием в связи с уменьшением числа экранирующих поверхностей в единице объема. Вследствие различной упаковки, обусловленной различием в размерах зерен, изменяются также абсолютные размеры и конфигурация межкусковых пор. В слое из более крупных частиц размеры пор увеличиваются, конфигурация их становится менее сложной и отклонения излучаемого теплового потока от основного направления снижаются.

Другим важным обстоятельством является изменение теплопроводности газовой среды при соответствующем изменении размеров и объема макропор. Так, по данным специальных исследований [8, 9], теплопроводность воздуха в порах различных размеров изменяется следующим образом (табл. 1).

Таблица 1

Диаметр пор, мм	Температура, °C	Теплопроводность воздуха	
		ккал/м час град	в % от исходной
0,1	0	0,021	100
до 0,2	0	0,027	128
0,1	100	0,027	100
до 0,2	100	0,044	163

Как показывают простые расчеты, конвективная передача тепла от парогазовой смеси к сланцу играет во всех трех рассматриваемых вариантах примерно одинаковую роль. Хотя с уменьшением диаметра кусков скорость движения газов в каналах пор возрастает, величина активной тепловоспринимающей поверхности снижается и объемный коэффициент конвективной теплоотдачи для всех трех классов крупности остается постоянным.

На основании рис. 8 можно оценить также влияние температурного потенциала на равномерность распределения температуры по высоте слоя. С повышением потенциала угол наклона прямых (относительно оси абсцисс) уменьшается, т. е. равномерность распределения температуры по высоте слоя снижается. За критерий приближенной оценки равномерности прогрева слоя представляется возможным принять величину разности температур греющей поверхности и минимальной установившейся в слое. Тогда при

$$\begin{array}{l}
 t_{\text{макс}}, \quad \quad \quad = 500 \quad 600 \quad 700 \quad 800 \text{ } ^\circ\text{C} \\
 \text{из } \Delta t = t_{\text{макс}} - t_{\text{мин}}, \quad = 320 \quad 370 \quad 430 \quad 475 \text{ } ^\circ\text{C} \\
 \text{следует } \Delta t/t_{\text{макс}} \quad \quad = 0,64 \quad 0,62 \quad 0,61 \quad 0,59
 \end{array}$$

При повышении температурного потенциала системы относительно большее количество передаваемого слою тепла расходуется на перегрев хорошо нагретых слоев полукокса до сравнительно высокой температуры; при этом уменьшается доля тепла, расходуемого на нагрев относительно холодной части слоя. Указанные соображения в меньшей мере относятся и к случаю нагрева сланца в целике.

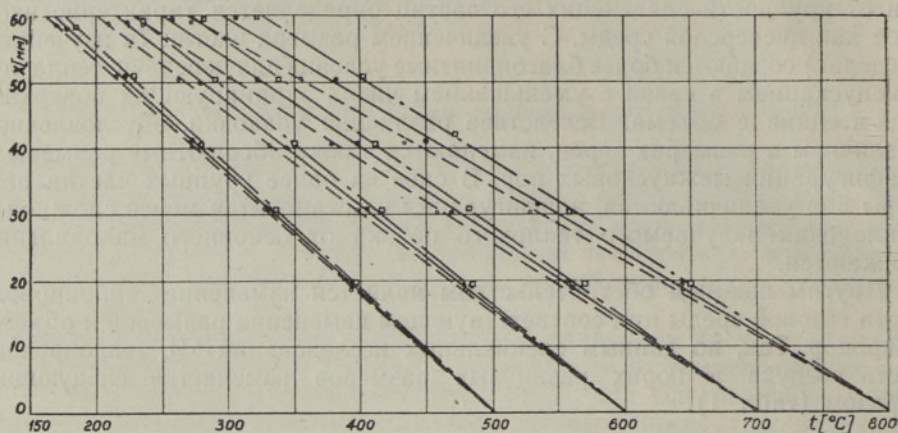


Рис. 8. Температурное поле в зернистом слое сланца различной крупности при установившемся тепловом режиме (отбор сверху,  $W_p \approx 4\%$ ).

Условные обозначения: — — — фракция 1—4 мм;  
 — — — фракция 4—7 мм; — · — · — фракция 7—12 мм.

Влияние метода эвакуации парогазовой смеси на распределение температуры в слое при установившемся режиме может быть охарактеризовано следующим образом. В случае эвакуации газа на холодную сторону (прямоток) температурное поле более сжато, нежели при противотоке. С другой стороны, при прямотоке прогрев слоя происходит интенсивнее и, как указано выше, для достижения стационарного состояния требуется меньший промежуток времени.

### Заключение и выводы

Анализ результатов проведенных исследований позволяет прийти к выводам, имеющим как теоретическое, так и практическое значение.

Специфической особенностью процесса термической переработки сланца в куске (целике) является ограничение скорости прогрева материала во внутренних слоях, которое определяется скоростью нагрева периферийных слоев целика на различных стадиях переработки. При небольших значениях скорости нагрева (как это имеет место в рассмотренном случае) влияние эндотермических реакций разложения органического вещества сланца проявляется лишь в незначительной степени; поэтому скорость нагрева внутренней части куска можно считать практически неизменной во времени.

С увеличением напряженности теплового поля, имеющим место в зернистом слое (а также при более интенсивном нагреве кускового сланца), эта закономерность в известной мере нарушается, хотя изложенный выше основной вывод остается в силе.

Интенсификации распространения теплового потока в зернистом слое в наибольшей мере содействует улучшение условий передачи тепла лучеиспусканием. При заданном температурном потенциале процесса это стимулируется как увеличением крупности зерен (в изученных пределах), так и достижением возможно большей однородности частиц по крупности. Поэтому при термической переработке зернистого сланца всегда следует стремиться к тщательной сортировке материала.

Повышение температурного потенциала процесса также влечет за собой интенсификацию теплоотдачи за счет усиления лучеиспускания.



Однако оно связано с излишним перегревом материала в периферийной части слоя. При эвакуации продуктов термического разложения сланца на горячую сторону (в противотоке) это явление служит причиной их дополнительного усиленного пиролиза. Оно должно быть учтено при разработке того или иного технологического метода.

Результаты настоящего исследования служат также экспериментальной основой для приближенного определения коэффициентов эффективной теплопроводности и температуропроводности прибалтийского сланца-кукерита в целике и зернистом слое.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К. Д. Воскресенский, Сборник задач по теплопередаче, М.—Л., Госэнергоиздат, 1951.
2. М. Я. Губергриц, Теплообмен в шахте полукоксования сланцевого генератора, Сб. «Техника и экономика промышленного полукоксования прибалтийского сланца», Л., Гостоптехиздат, 1957.
3. Г. А. Исаков, Расположение зон в камерных печах, Труды ВНИИПС, вып. 3, Л., Гостоптехиздат, 1955.
4. К. А. Куйв, Динамика нагрева и некоторые теплофизические свойства сланца-кукерита, Изв. АН ЭССР. Серия техн. и физ.-мат. наук, том V, № 4, 1956.
5. А. В. Лыков, Теория теплопроводности, М., Гостехтеориздат, 1952.
6. Г. В. Озеров, Исследование технологического режима горизонтально вращающихся реторт для полукоксования горючего сланца, Диссертация, Таллинский политехнический институт, 1955.
7. Н. Д. Серебрянников, Исследование процесса газификации горючих сланцев в камерных печах, Диссертация, Московский Химико-технологический институт им. Д. И. Менделеева, 1956.
8. К. Ф. Фокин, Строительная теплотехника ограждающих частей зданий, М., Госстройиздат, 1953.
9. А. Ф. Чудновский, Теплообмен в дисперсных средах, М., Гостехтеориздат, 1954.

*Институт химии  
Академии наук Эстонской ССР*

Поступила в редакцию  
2 IV 1957

## PÕLEVKIVI KUUMUMISDÜNAAMIKA ÜHEPOOLSEL KUUMUTAMISEL

M. Gubergrits,

tehniliste teaduste kandidaat

K. Kuiv

*Resümee*

Artiklis käsitletakse temperatuurivälja muutumist põlevkivis mitmesugustel kuumutustemperatuuridel (500—800° C). Antud katsetingimustes vaadeldakse soojusvoo levikut kuumutuspinnal normaali suunas. Tekkiva temperatuurivälja kohta esitatud andmed hõlmavad nii mittestatsionaarset kui ka statsionaarset soojusrežiimi.

Kuumutuspinnal vahetus läheduses toimub soojuse levik nii põlevkivitükis kui ka põlevkivikihis analoogiliselt. Sisemistes põlevkivikihi osades omab (eriti temperatuuridel 700—800° C) määravat tähtsust soojuse intensiivsem levik kiirguse teel. Mida suurema tüükilise ja ühtlasem on igas katsevariandis kasutatud peenpõlevkivi fraktsioon, seda kõrgematel temperatuuridel toimub temperatuurivälja tasandumine.

Kuumutustemperatuuri tõstmine intensiivistab soojusülekanne kiirguse teel, kuid kutsub esile perifeerse kihiosa ülekuumenemise, ühtlasi halveneb temperatuurivälja tasandumine kogu kihi ulatuses.

Soojusvoo suunaga paralleelne põlevkivi termiliste lagunemisproduktide evakuatsiooni suund kiirendab temperatuurivälja tasandumist, kusjuures mitmesuguse suurusega põlevkivitükkidest koosnevate fraktsioonide puhul ei esine märgatavaid erinevusi.

Käesoleva katselise uurimistöö tulemused on kasutatavad põlevkivi ligikaudsete efektiivsete soojustehniliste näitajate määramise alusena.

*Eesti NSV Teaduste Akadeemia  
Keemia Instituut*

Saabus toimetusse  
2. IV 1957

**DYNAMICS OF KUKERSITE OIL SHALE HEATING  
(ONE SIDE HEAT ADMISSION)****M. Gubergrits, K. Kuiv***Summary*

The article deals with the results of an experimental investigation of the isothermal heating of Estonian oil shale under one side heat admission and at different temperatures of the heating surface. Commonly the case may be regarded as lineary heat spreading in normal direction to the heating surface.

The influence of some factors on the temperature distribution in the oil shale — single piece and granular bed — was studied under a steady and unsteady thermal state. The most important of these factors are: the heating surface temperature, the piece and the bed linear dimension, the uniformity of particle size distribution (granular bed), and the direction of evacuation of thermal decomposition products.

The experimental data may be utilized for an approximate computation of effective thermal conductivity and diffusivity factors of Kukersite oil shale.

*Academy of Sciences of the Estonian SSR,  
Institute of Chemistry*

Received  
April 2, 1957