



**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА ЧАСТИЦ  
ГОРЮЧЕГО СЛАНЦА И ЗОЛЬНЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ В УСЛОВИЯХ  
ПОЛУКОКСОВАНИЯ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ БАРАБАННОМ РЕАКТОРЕ УТТ**

**А.А. Селиванов<sup>1</sup>, П.А.Батраков<sup>2</sup>, А.Н. Мракин<sup>1</sup>, И.А. Вдовенко<sup>1</sup>, О.В. Афанасьева<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> **Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,  
г. Саратов, Россия. e-mail: sstuoffice@sstu.ru**

<sup>2</sup> **Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия  
e-mail: info@omgtu.ru**

<sup>3</sup> **Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия  
e-mail: eccolga@mail.ru**

**Резюме:** В статье рассматриваются вопросы моделирования процесса теплообмена в барабанном реакторе установки полукоксования горючего сланца с твердым теплоносителем между частицами золы и сланца в условиях постоянного выделения парогазовых продуктов. Выявлена доминирующая роль конвективной составляющей процесса и получены кривые прогрева частиц сланца с учетом эндотермического эффекта.

Установлено, что наиболее мелкая фракция топлива прогревается в течение 30-60 секунд и в дальнейшем служит источником теплоты для остальных фракций. В интервале 400-600 секунд завершается прогрев самой крупной фракции. Дальнейшее пребывание сланцево-золистой смеси в реакторе вызвано отставанием скорости процесса термического разложения от теплообмена, а снижение температуры на 20-25<sup>0</sup>С наличием эндотермического эффекта разложения органического вещества.

**Ключевые слова:** горючий сланец, полукоксование, теплообмен, твердый теплоноситель, барабанный реактор.

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-08-00295 «А».

**Для цитирования:** Селиванов А.А., Батраков П.А., Мракин А.Н., Вдовенко И.А., Афанасьева О.В. Математическое описание процесса теплообмена частиц горючего сланца и зольным теплоносителем в условиях полукоксования во вращающемся барабанном реакторе УТТ // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 6. С. 51-60. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-51-60.

**THE MATHEMATICAL DESCRIPTION OF PROCESS OF HEAT EXCHANGE  
PARTICLES OF OIL SHALE AND ASH THE COOLANT IN THE SEMI-COKING  
CONDITIONS IN A ROTATING DRUM REACTOR INSTALLATION WITH SOLID  
HEAT CARRIER**

**AA Selivanov<sup>1</sup>, PA Batrakov<sup>2</sup>, AN Markin<sup>1</sup>, IA Vdovenko<sup>1</sup>,  
OV Afanaseva<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> **Gagarin Yu.A. Saratov State Technical University, Saratov, Russia**

<sup>2</sup> **Omsk State Technical University, Omsk, Russia**

<sup>3</sup> **Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia**

**Abstract:** The article deals with the modeling of heat transfer process in a drum reactor of a semi-coking unit of oil shale with a solid coolant between ash and shale particles in the conditions of constant separation of vapor-gas products. The dominant role of the convective component of the process is revealed and the curves of heating of shale particles are obtained taking into account the endothermic effect.

*It is established that the smallest fraction of fuel warms up within 30-60 seconds and further serves as a source of heat for other fractions. In the interval of 400-600 seconds, the heating of the largest fraction is completed. The further stay of the shale mixture in the reactor is caused by the lagging rate of the thermal decomposition process from heat exchange, and the temperature decrease by 20-25<sup>0</sup>C by the presence of the endothermic effect of the decomposition of organic matter.*

**Key words:** oil shale, semi-coking, heat exchange, solid coolant, drum reactor.

**For citation:** Selivanov AA, Batrakov PA, Markin AN, Vdovenko IA, Afanaseva OV. The mathematical description of process of heat exchange particles of oil shale and ash the coolant in the semi-coking conditions in a rotating drum reactor installation with solid heat carrier. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(6):51-60. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-51-60.

### Введение

Проектирование и строительство эффективных тепломассообменных устройств, работающих с оптимальными показателями, требует продолжительных и дорогостоящих исследований с первичной реализацией процессов на стендовых и полупромышленных аналогах. Важной составляющей является математическое описание, учитывающее основные закономерности теплового взаимодействия фаз.

Термическая переработка полидисперсных сыпучих топлив при постоянном перемешивании с инертным теплоносителем имеет достаточно широкое распространение в химической промышленности и энергетике. В особенности может быть выделена активно развивающаяся отрасль переработки горючего сланца на основе использования установок типа УТТ в Эстонии [1, 2].

При этом многочисленные вопросы остаются при детальном изучении механизма протекания процессов передачи теплоты в условиях взаимодействия сланца и зольного теплоносителя. Экспериментальные и теоретические исследования по протеканию тепломассообменных процессов при термической переработке мелкодисперсного топлива приведены в [1–5]. Обращает на себя внимание различие в условиях проведения физических экспериментов, конструктивные особенности аппаратов, а также особенности состава органической и минеральной части горючего сланца в зависимости от места добычи. Кроме того имеется ряд результатов, полученный аналитическим способом при принятых допущениях. Использование этих данных для инженерных и практических расчетов требует определенных уточнений и дополнений. Сложность в описании процесса теплового взаимодействия сланца и зольного теплоносителя также вносит полидисперсность и различие составов выделяющихся парогазовых продуктов с течением времени. Очень важна уже имеющаяся информация по взаимодействию топлива с твердым и газовым теплоносителем.

Таким образом, можно полагать об отсутствии на сегодняшний день математической модели процесса теплообмена сланца и зольного теплоносителя в барабанном реакторе УТТ с учетом особенностей состава самого топлива и продуктов термического взаимодействия, неоднородности в гранулометрическом составе и форме частиц, конструктивных особенностей аппарата с учетом вращения и др.

### Теоретические основы и результаты

При описании закономерностей теплового взаимодействия частиц сланца и теплоносителя особый интерес представляют работы [1, 2, 6]. Неравномерность прогрева частиц по времени происходит по причине реагирования двух неоднородных компонентов (гранулометрический состав дисперсных материалов). На (рис.1) показана схема взаимодействия частиц с учетом непрерывно выделяющихся продуктов полукоксования.

Исходя из (рис.1) перенос теплоты от частиц зольного теплоносителя (ЗТ) топливным частицам осуществляется через парогазовую прослойку (ПГС) с постоянно изменяющимися свойствами и составом. В свою очередь контактное взаимодействие частиц носит кратковременный характер ввиду вращения барабанного реактора.

Известно, прогрев твердых частиц определяется одновременным действием двух процессов: теплопередача от теплоносителя к поверхности и распространение ее вглубь частиц и зависит от размера, формы частиц, пористости, физических свойств теплоносителя и скорости движения газовой среды [7].

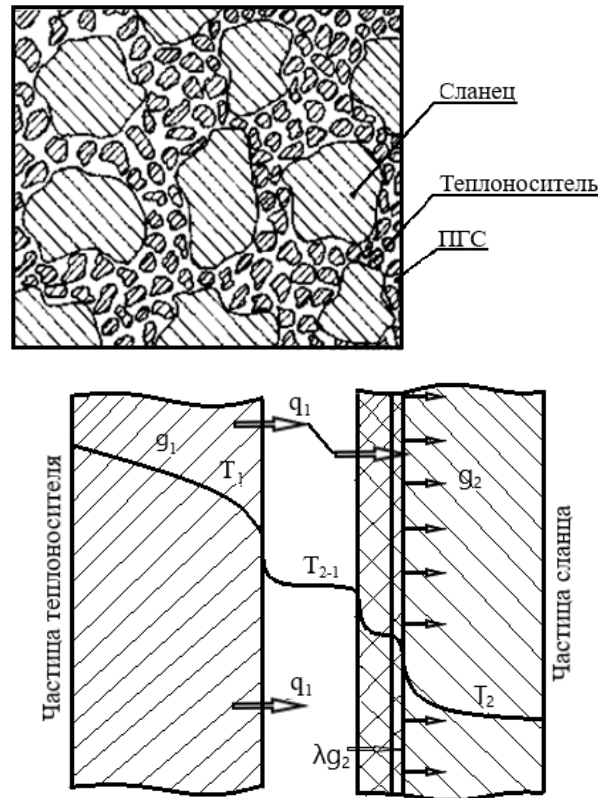


Рис. 1. Схема взаимодействия частиц сланца и золы в барабанном реакторе (БР)

Критерий Био позволит определить наличие внутреннего температурного градиента, который является определяющим для нахождения скорости проникновения теплоты от поверхности к центру частицы(1)

$$Bi = \frac{\alpha \cdot l}{2 \cdot \lambda}, \quad (1)$$

где  $l$  – определяющий размер, м;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C); размер

Как известно, сланец имеет плиточную структуру строения, что, в свою очередь, влияет на минимизацию расстояния от поверхности частиц до центра и значительно сокращает время прогрева.

При определении площади поверхности частиц неправильной формы используют эквивалентный диаметр  $d_{\text{э}}$ , м. Для учета формы частиц используется коэффициент формы  $\Phi$ , определяющий отклонение формы реальных частиц от шара. В нашем случае важно учитывать тепловоспринимающую поверхность сланцевых и зольных частиц. При соотношениях сторон параллелепипеда  $a \times a \times 0,5a$  фактор формы составит (2)

$$\Phi_i = \sqrt{\frac{S_c}{S_i}} = \sqrt{\frac{\pi \cdot d_{\text{э}}^2}{4a^2}} = 0,8727 \frac{d_{\text{э}}}{a}, \quad (2)$$

где  $S_c/S_i$  – отношение площадей поверхности сферы к площади поверхности реальной частицы  $i$ -той фракции одинакового объема;  $d_{\text{э}}$  – эквивалентный диаметр частиц, м<sup>2</sup>;  $a$  – длина ребра частиц правильной формы, м.

В табл. 1, 2 приведены значения  $d_{\text{э}}$  и  $\Phi$  частиц геометрически правильной формы и осредненные значения  $\Phi_i$  для частиц неправильной формы.

Таблица 1

Значения  $d_g$  и  $\Phi_i$  частиц различных форм




№	Форма частицы	Эквивалентные диаметры		Фактор формы, $\Phi_i$
		$d_{v,i}$	$d_{f,i}$	
1	2	3	4	5
1	 - $(a \times a \times 2a)$	$1,5632 \cdot a$	$1,7841 \cdot a$	0,8762
2	 - $(a \times a \times 0,5a)$	$0,9847 \cdot a$	$1,1284 \cdot a$	0,8727
3	 - $a$ , высотой $h = 0,1a$	$0,5759 \cdot a$	$0,8740 \cdot a$	0,6589
4	Пластина шестиугольная с ребром $a$ , высотой $h = 0,1a$	$0,7917 \cdot a$	$1,3583 \cdot a$	0,5828

Таблица 2

Средние значения фактора формы для топливных частиц

№	Вид топлива	$\Phi^2$	$\Phi_i$
1	сланец - размер фракции ( $d = 2,5 \div 11,2$ мм)	0,426	0,653
2	сланец - размер фракции ( $d = 5 \div 25$ мм)	$0,46 \div 0,68$	0,755
3	сланец - размер фракции ( $d = 34 \div 62,5$ мм)	0,758	0,871
4	каменный уголь ( $d = 6 \div 11,25$ мм)	0,536	0,732
5	металлургический кокс ( $d = 6 \div 11,25$ мм)	0,403	0,635

В работе Симонова В.Ф. «Определение кинетических констант выделения газовых продуктов при термодеструкции сернистого горючего сланца» были рассмотрены фракционный состав сланца для полукоксования, где 84 % от общей массы частицы имеют размер  $< 5$  мм. Данные фракции сланца как уже было сказано выше имеют плиточную форму:  $h = 0,54a$ ,  $L = 1,43a$ ,  $b = a$ . При этом важнейшим показателем является

минимальное расстояние от центра части к поверхности.  $\frac{h_{пл}}{2} = 0,94$  мм. В

ориентировочном интервале значений  $\alpha$  ( $15 \div 75$  Вт/м<sup>2</sup>·°C) и известному значению  $\lambda_{сл} = 0,266$  Вт/м·°C выполняется соотношение  $B_i \leq 0,1 - 0,2$ . Данный факт подтверждают авторы [1]. Таким образом, для мелкой и средней фракции сланца, занимаемой подавляющее большинство при переработке в схеме УТТ, можно предполагать отсутствие внутреннего температурного градиента.

Вторым основным процессом является перенос теплоты от поверхности частиц ЗТ через ПГС с постоянно изменяющимся составом к поверхности сланцевых частиц.

Данные о работе пилотных и промышленных реакторов типа УТТ, об особенностях движения сыпучего материала в БР, а также о структурно механических характеристиках Кашпирского сланца и сыпучих продуктах полукоксования приведены в работах [8,9] – табл.3, 4

Таблица 3

Технические характеристики установок УТТ[2]

Установка	Реактор		Частота вращения, об/мин.	Время пребывания		Скорость движения твердого материала, м/с	Производительность по сланцу, т/ч
	Отношение диаметров барабана (внутр./внешн.)	Длина, м		твердого материала, мин.	ПГС, с.		
УТТ-200	1,64/2	4,5	1,83	20,6	18	0,35	6,34
УТТ-500	2,52/3	6,0	1,18	21,4	15	0,57	20,2
УТТ-3000	4,38/5	14,0	0,92	20,7	21,2	1,1	139,0

Таблица 4

Структурно механические характеристики Кашпирского сланца и его продуктов

Материал	Угол естественного откоса, град.		Плотность, кг/м <sup>3</sup>			Пористость, % по объему
	динамический	статический	насыпная	истинная	кажущаяся	
Сланец	45,4	42,1	819	2180	1830	15,3
КЗО (сланцевый полукокс)	42,7	39,5	823	2350	1760	23,7
Зольный теплоноситель	42,2	38,7	788	2480	1690	32,2
Зола уноса	41,8	37,9	762	2410	1650	33,4

На основе характеристик табл. 3, 4, данных о степени заполнения и конструктивных параметрах БР [9], а также результатов исследования процесса выделения ПГС [2] при известных расходных характеристиках по сланцу и золе получим соотношения для расчета объема каждого элементарного участка (рис. 2.) – (3) и времени пребывания сланцезольной смеси в БР – (4):

$$V_i = \frac{\left( \frac{g_{сл}}{\rho_{сл}} + \frac{g_з}{\rho_з} \right) \cdot \tau_i}{(1 - \varepsilon)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D_6^2}{4} \cdot l, \text{ м}^3 \quad (3)$$

$$\tau = V_6 / \sum_1^n V_i \quad (4)$$

где  $\tau_i$  – временной интервал расчета, с;  $V_6$  – свободный внутренний объем барабанного реактора, м<sup>3</sup>;  $g_{сл}$ ,  $g_з$  – расход сланца и ЗТ, кг/с;  $\varepsilon$  – порозность движущегося слоя, согласно;  $\rho_{сл}$ ,  $\rho_з$  – кажущаяся плотность сланца и ЗТ, кг/м<sup>3</sup>;  $D_6$  – внутренний диаметр БР, м;  $\sum_1^n V_i$  – объем выделившихся компонентов ПГС, м<sup>3</sup>/с.

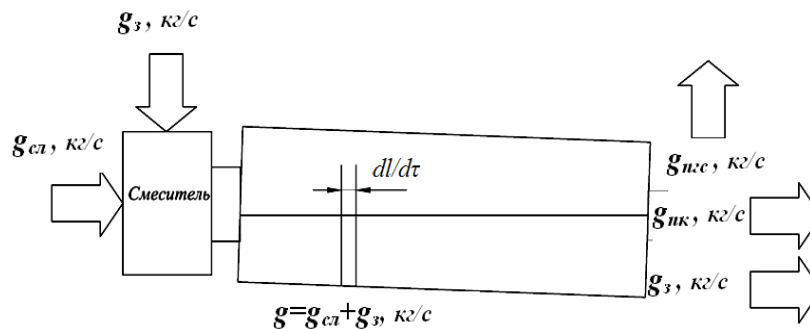


Рис. 2. Распределение материальных потоков в процессе полукоксования в БР

Время пребывания объема  $V_i$  в БР зависит от особенностей процесса выделения ПГС в сегменте толщиной  $l$ , м. (рис.2).

Лучистый теплообмен в установках подобного типа не превышает 7%, следовательно, влияние его по сравнению с конвективным незначительно [10].

Вторым важным обстоятельством является анализ контактной составляющей теплообмена. Типовые модели теплового взаимодействия твердых мелкодисперсных материалов имеют существенные различия с картиной взаимодействия сланца и теплоносителя в реакторе в условиях выделения ПГС [11]. В частности они предполагают продолжительный тепловой контакт частиц, который отсутствует в барабанном реакторе ввиду постоянного перемешивания и поступательного движения вперед, а также активной фильтрации продуктов полукоксования. Это дает право полагать о подавляющем влиянии конвективного переноса теплоты, а условия теплового взаимодействия могут быть представлены на основе результатов работ [1, 2] (Рис. 1).

Таким образом, при движении смеси частиц сланца и ЗТ будет происходить фильтрация ПГС через разрыхленный слой частиц со значением порозности слоя превышающим рекомендуемые для движущегося плотного слоя. В работе [9] приведены данные по взаимодействию твердого теплоносителя (в форме шаров) и газа пропускаемого через засыпку. Значения критерия Рейнольдса  $12 < Re < 2100$ . Уравнение, характеризующее значение критерия Нуссельта, имеет вид (5)

$$Nu = 2 + 1,3 \cdot Pr_m^{0,15} + 0,66 \cdot Re_m^{0,15} \cdot Pr_m^{0,31} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \quad (5)$$

Похожие выражения приведены в работах А.П. Баскакова, В.Н. Тимофеева [10]. Скорость фильтрации газа через засыпку будет определяться с учетом постоянно растущего количества продуктов полукоксования.

$$w_{ПГС} = \frac{V_{лет}}{f \cdot \varepsilon}, \quad (6)$$

где  $f = D_0 \cdot l$  – поверхностная площадь сегмента участка твердой фазы при движении материала в реакторе (рис.2),  $m^2$ ;  $V_{лет}$  – суммарный объем ПГС на расчетном участке,  $m^3/c$ .

Число Рейнольдса вычисляется по формуле (7)

$$Re = \frac{4 \cdot w_{ПГС}}{f_0 \cdot \nu}, \quad (7)$$

где  $f_0 = f(1 - \varepsilon)$  – удельная поверхность частиц в  $1 m^3$  слоя,  $m^2/m^3$ ;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости ПГС,  $m^2/c$ .

Объемный расход ПГС будет складываться из значений удельных объемных расходов газов, выделяющихся на каждом участке за время в соответствии с температурой в заданном промежутке с учетом массового расхода (8),  $m^3/c$ :

$$V_{лет} = \sum_1^n g_i^{лет} \cdot v_i^{уд}, \quad (8)$$

где  $g_i^{лет}$  – выход ПГС на  $i$ -том участке,  $кг/с$ ;  $v_i^{уд}$  – удельный объем ПГС на  $i$ -м участке (9),  $m^3/кг$ :

$$v_i^{уд} = \sum_1^n \left( \frac{v_j^{уд}}{M_j} \right) \cdot \left( \frac{T_i}{T_0} \right), \quad (9)$$

где  $v_j^{уд}$  – удельный объем  $j$ -го компонента,  $m^3/кг$ .

Тепловой поток как со стороны зольных частиц к ПГС, так и от ПГС к сланцевым частицам будет определяться по классическому уравнению Ньютона-Рихмана (10). Частицы сланца ( $i$ -той фракции), в заданный временной интервал  $\Delta\tau$ , способны воспринимать от парогазовой среды количество теплоты  $\Delta Q_i$ ,  $кДж$ , определяемое выражением

$$\Delta Q_i = \alpha_i \cdot F_i (t'_{ПГС} - t'_{f,i}) \cdot \Delta\tau \cdot 10^{-3}, \quad (10)$$

где,  $\alpha_i$  – соответственно коэффициенты теплоотдачи,  $Вт/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $F_i$  – тепловоспринимающие поверхности,  $m^2$ ;  $t'_{f,i}$  – температуры поверхностей частиц,  $^\circ C$ , каждой  $i$ -й фракции. С учетом данных по фракционному составу и геометрической форме, выражение для определения тепловоспринимающей поверхности примет вид (11)

$$F_i = f_i \cdot m_i = \frac{6}{\rho_i \cdot d_{\Phi,i} \cdot \Phi_i^2} \cdot m_i. \quad (11)$$

### Обсуждение

Расчеты по разработанному математическому описанию проводились с учетом результатов [8, 12, 15], где получены данные по константам выделения продуктов полукоксования для различных уровней прогрева материала с соответствующим выходом ПГС.

Для проверки правильности выбранных соотношений для описания особенностей теплового взаимодействия сланца и ЗТ с учетом ПГС необходимо сопоставление результатов численного и физического экспериментов. В качестве исходных данных были приняты результаты [13, 14].

Таблица 5

Сравнение результатов математической модели с экспериментальными результатами [10]

Показатели	№ опыта (численный эксперимент/ физический эксперимент)			
	1	2	3	4
Время пребывания смеси, с	1198/1188	1036/1144	512/799	769/954
Газы дезоксидации ( $\text{CO}_2$ , $\text{H}_2\text{O}$ , $\text{H}_2\text{S}$ ), % масс	33,27/32,27	32,93/32,00	31,98/28,7	32,1/40,4
Легкие газы ( $\text{H}_2$ , $\text{CO}$ , $\text{CH}_4$ , $\text{C}_m\text{H}_n$ ), % масс	9,69/8,1	9,65/11,7	9,4/16,9	9,51/35,3
Смола, % масс.	57,03/59,6	57,41/56,3	58,6/54,4	56,3/24,3
Среднеопытная погрешность, %	1,71	1,36	4,99	22,03
Общая погрешность, %	7,52			

Согласно таблице 5, суммарная относительная погрешность по всем опытам находится в пределах 10%, а отдельно по опытам 25%, что подтверждает адекватность выбранных экспериментальных данных и эмпирических соотношений.

Данные рисунка 3 определяют интенсивность прогрева различных фракций сланца и снижение температуры теплоносителя, полученные в результате численного эксперимента на математической модели процесса полукоксования сланца и ЗТ (теплообмен осложненный выделением ПГС) [6,9,12].

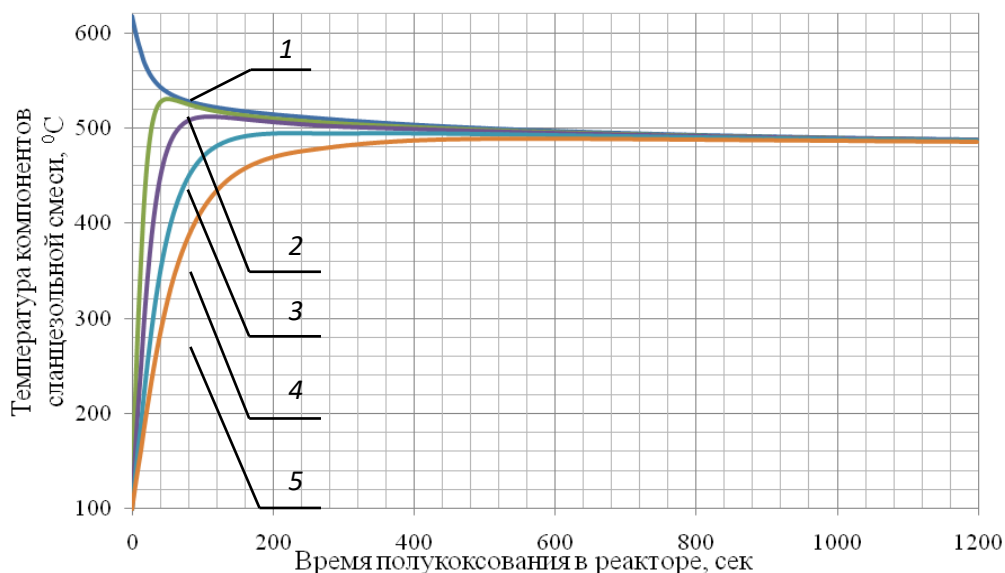


Рис. 3 Кривые прогрева сланца полифракционного состава:

1 – 3Тд=1 мм; 2 – фракция 0-3 мм; 3 – фракция 3-7 мм; 4 – фракция 7-11 мм; 5 – фракция 11-15 мм

Как видно из рис. 3 имеет место перегрев (выше принятой температуры полукоксования  $500^{\circ}\text{C}$ ) мелких фракций, которые в процессе движения материала по барабанному реактору играют роль дополнительного источника теплоты для более крупных фракций. В интервале 400-600 секунд завершается прогрев самой крупной фракции. Кроме того впоследствии происходит понижение температуры сланцевозольной смеси за счет учтенного в модели эндотермического эффекта разложения органической массы сланца с соответствующими кинетическими константами реакций [8].

### Выводы:

1. Показано практическое отсутствие внутреннего температурного градиента у большинства частиц сланца при прогреве.
2. Выявлена доминирующая роль конвективного переноса теплоты от ЗТ к частицам сланца через ПГС с изменяющимся составом и свойствами.
3. В результате проведения численных экспериментов получены данные прогрева горючего сланца полифракционного состава. Показано, что наиболее мелкая фракция топлива прогревается в течение 30-60 секунд и в дальнейшем служит источником теплоты для остальных фракций.
4. Показано влияние эндотермического эффекта разложения органического вещества ГС, что приводит к снижению температуры потока на 20-25 °С.

### Литература

- 1.Блохин, А.И., Зарецкий М.И, Стельмах Г.П., и др. Энерготехнологическая переработка топлив твердым теплоносителем. М.: Светлый стан, 2005. 336 с.
- 2.Волков Э.П. Энерготехнологическое использование сланца. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 480 с.
- 3.Иорудас, К.А., Стельмах Г.П. Тепло и массообмен в реакторе установок с твердым теплоносителем: Тезисы доклада 2 Всесоюзной научно-технической конференции. "Гидроупругость и долговечность конструкций энергетического оборудования" // Изд. Лит. ССР. Июль 1990. С. 213-214.
- 4.Хасхахи В.В. Экспериментальное исследование тепло-массообменных процессов переработки горючего сланца в установке с твердым теплоносителем (УТТ) // В сборнике: Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии 18 Бенардосовские чтения: материалы международной научно-технической конференции. 2015. С. 220-223.
- 5.Печенегов, Ю.Я., Мракин А.Н. Влияние стефановского потока на теплообмен в системе "газ-твердая частица" при термохимической конверсии твердого топлива // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90. № 5. С. 1152-1154.
- 6.Al-Ayed, OS. Distillation curves under the influence of temperature and particle size of Ellajjun oil shale // International Green Energy Conference. Canada: N. p., 2005. pp. 1-4.
- 7.AdnanAl-Harabsheha, Omar Al-Ayed, Moh'dAl-Harabsheh, Rajab Abu-El-Halawah. Heating rate effect on fractional yield and composition of oil retorted from El-lajjun oil shale // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, V.89. Issue 2. November 2010. pp. 239-243.
- 8.Симонов В.Ф., Селиванов А.А., Мракин А.Н., и др. Определение кинетических констант выделения газовых продуктов при термодеструкции сернистого горючего сланца // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2015. Т. 4. №1 (81). С. 219-224.
- 9.Selivanov A.A., Batrakov P.A., Mrakin A.N., et al. Mathematical modeling of the carbon burn-out process from the shale semi-coke surface of aerofountain technological furnace in the solid heat-carrier oil shale semi-coking scheme // Procedia Engineering. 2016. 152. pp. 134-139.
- 10.A.P.Baskakov, B.Leckner. Radiative heat transfer in circulating fluidized bed furnaces / Powder Technology. 1997. V. 90. Issue 3. pp 213-218
- 11.A. I. Nafsun, F. Herz, E. Specht, H. et al. Thermal bed mixing in rotary drums for different operational parameters // Chemical Engineering Science. 2017. V.16. pp. 346-353.
- 12.Simonov V.F., Mrakin A.N., Selivanov A.A., et al., Development of an algorithm for calculating the parameters of a drum reactor for low-temperature carbonization of oil shale with ash-based heat-transfer agent // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. V. 52. pp. 675-681.
- 13.Казаков, Е.И., Мамай В.И., Мишанин В.А., и др. Определение основных технологических параметров термической переработки сланца Перелюб-Благодатовского месторождения на стендовой установке с твердым теплоносителем (УТТ) // Межвузовский научный сборник СПИ – Саратов: СПИ, 1982. С. 101-105.
- 14.Volkov E., Stelmakh G. The stages of research on creating commercial units for processing oil shale fines. Development of the "Galoter" process in 1944–1999 // Oil Shale. 1999. V.16. N.2. pp. 161-185.
- 15.Симонов В.Ф. О влиянии скорости нагрева горючих сланцев на динамику выделения летучих продуктов и их качественный состав // Вестник СГТУ. 2011. Т. 4. № 1 (59). С. 181-185.

### Авторы публикации

**Селиванов Алексей Александрович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплотехника», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.



**Батраков Пётр Андреевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», Омский государственный технический университет.

**Афанасьева Ольга Валерьевна** – канд. техн. наук, доцент кафедры ЭМС, Казанский государственный энергетический университет.

**Мракин Антон Николаевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплотехника», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

**Вдовенко Иван Анатольевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплотехника», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

## References

1. Blokhin, AI, Zaretsky MI, Stelmach GP, et al. *Energy technology processing of fuels with solid heat carrier*. M.: Svetly Stan, 2005. 336 p.
2. Volkov EP. *Energy technology use of slate*. M : Publishing House MEI, 2015. 480 p.
3. Iorudas KA, Stelmakh GP. *Heat and mass transfer in the reactor of plants with solid coolant: Abstracts of the 2 scientific and technical conf. "Hydroelasticity and durability of power equipment designs"*. Ed. Lit. SSR. July 1990. pp. 213-214.
4. Khaskhikhikh VV. An experimental study of heat and mass transfer processes for processing oil shale in a plant with a solid coolant (UTT). *In the collection: Current State and Prospects for the Development of Electrical and Thermotechnology 18 Benardos Readings: Materials of the International Scientific and Technical Conference*. 2015. pp. 220-223.
5. Pechenegov YuYa, Mrakin AN. The effect of the Stefan stream on heat transfer in the gas-solid particle system during thermochemical conversion of solid fuel. *Engineering Physics Journal*. 2017;90(5): 1152-1154.
6. Al-Ayed. Distillation curves under the influence of temperature and particle size of Ellajjun oil shale. *International Green Energy Conference*. Canada: 2005. pp. 1-4.
7. Adnan Al-Harashsheha, Omar Al-Ayed, Moh'd Al-Harashsheh, Rajab Abu-El-Halawah. Heating rate effect on fractional yield and composition of oil retorted from El-lajjun oil shale. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 2010. V.89. Issue 2. pp.239-243.
8. Simonov VF, Selivanov AA, Mrakin AN, et al. Determination of the kinetic constants for the evolution of gaseous products during thermal decomposition of sour fuel. *Bulletin of the Saratov State Technical University*. 2015;4(1):(81):219-224.
9. Selivanov AA, Batrakov PA, Mrakin AN. Mathematical modeling of the carbon burn-out process from the shale semi-coke surface of aerofountain technological furnace in the solid heat-carrier oil shale semi-coking scheme. *Procedia Engineering*. 2016;152:134-139.
10. Baskakov AP, Leckner B. Radiative heat transfer in circulating fluidized bed furnaces. *Powder Technology*. 1997;90(3):213-218.
11. Nafsun A, Herz F, Specht E, et al. Thermal bed mixing in rotary drums for different operational parameters. *Chemical Engineering Science*. 2017;160 (16) :346-353.
12. Simonov VF, Mrakin AN, Selivanov AA, et al. Development of an algorithm for calculating the parameters of a drum reactor for low-temperature carbonization of oil shale with ash-based heat-transfer agent. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017;52:675-681.
13. Kazako EI, Mamai VI, mishanin VA, et al. *Determination of main technological parameters of thermal processing of oil shale Perelyub-Blagodatovka field for bench set with solid heat carrier (UTT) interuniversity scientific collection of SLEEP – Saratov: SPI, 1982. pp. 101-105.*
14. Volkov E, Stelmakh G. The stages of research on creating commercial units for processing oil shale fines. Development of the "Galoter" process in 1944-1999. *Oil Shale*. 1999;16(2):161-185. 4. A.
15. Simonov VF, Morev AA. About the influence of the heating rate of oil shale on the dynamics of the evolution of volatile products and their qualitative composition. *Bulletin of SSTU*. 2011;4(1): (59):181-185.

**Authors of the publication**

*Alexey A. Selivanov* – Gagarin Yu.A. Saratov State Technical University, Saratov, Russia.

*Petr A. Batrakov* – Omsk State Technical University, Omsk, Russia.

*Olga V. Afanaseva* – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Anton N. Mrakin* – Gagarin Yu.A. Saratov State Technical University, Saratov, Russia.

*Ivan A. Vdovenko* – Gagarin Yu.A. Saratov State Technical University, Saratov, Russia.

*Поступила в редакцию*

*15 июля 2019г.*