

**ПРОЦЕСС РАЗВИТИЯ МАКСИМАЛЬНОГО  
ДАВЛЕНИЯ РАСПИРАНИЯ ПРИ  
КОКСОВАНИИ УГЛЕЙ. СООБЩЕНИЕ  
ВТОРОЕ. ПЛАСТОМЕТРИЧЕСКИЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ**

© 2010 Кузниченко В.М. к.т.н.,  
Сытник А.В. (УХИИ)

*В статье приведены результаты исследования динамики газового давления по ширине пластического слоя различных углей, определены барьеры для прохода газов коксования из пластического слоя на «холодную» и «горячую» его стороны. Показаны зависимости величины максимального газового давления в пластическом слое по мере удаления его от греющей стенки печи.*

*In the article the results of research for dynamics of gas pressure are given on the width of plastic layer of different coals, barriers are stated to the passage-way of coking gases from a plastic layer on «cold» and «hot» sides. Dependences of maximal gas pressure are shown in a plastic layer as far as its moving away from heating wall of stove.*

Ключевые слова: уголь, пластический слой, вспененная зона, газовое давление, массоперенос, препарирование, твердый остаток, физико-механические свойства.

.....

**И**звестно, что при коксовании большинства спекающихся углей в пластическом слое образуется вспененная зона, кажущаяся плотность которой наименьшая по сравнению с исходной угольной загрузкой и полукоксом-коксом [1, 2]. Объяснить уменьшение кажущейся плотности бурным газовыделением в этой зоне и ее расширением в результате вспучивания невозможно. Если бы это было так, то жирные угли, характеризующиеся наибольшей шириной вспененной зоны [2], должны бы развивать и наибольшее давление распираания. Однако, например, коксовые угли, у которых вспененная зона значительно меньше, развивают давление распираания в несколько раз большее, чем жирные [3, 4]. Очевидно, снижение кажущейся плотности во вспененной зоне связано с существенным массопереносом как пластической массы, так и парогазообразных продуктов коксования на «горячую» сторону пластического слоя. Ю.С. Васильевым с использованием метода рентгенографии показано, что вязкотекучая

пластическая масса, включая содержащиеся в ней инертные компоненты углей и минеральные примеси, перемещаясь в пластическом слое уплотняется на поверхности образующихся слоев полукокса [5]. При коксовании углей различных марок М.Г.Скляр с соавторами [6] наблюдали «резкое скачкообразное смещение массы на горячую сторону» у углей марок Ж и К. При этом смещение нелетучей массы в пластическом слое угля марки Ж составило 9 мм, а марки К – 3,5 мм. Это смещение авторы объясняют воздействием набухания угольных зерен. Однако зона набухших угольных зерен наблюдается у всех углей, в том числе и слабо спекающихся. Поэтому массоперенос в направлении против теплового потока в таком случае должен бы иметь место при коксовании всех более или менее спекающихся углей. Однако он наблюдается только у тех углей, которые образуют вспененную зону.

По нашему мнению причиной массопереноса является поверхностное натяжение ячеисто-пленочной системы вязкотекучей пластической массы вспененной зоны, действующее в направлении «горячей» стороны пластического слоя. Вновь образующиеся ячеисто-пленочные слои пластической массы сразу же оказываются под воздействием сил поверхностного натяжения и перемещаются в направлении полукокса. В результате этого материал вспененной зоны находится в растянутом состоянии, что и является основной причиной низкой кажущейся плотности в этой зоне. Базируясь на таком механизме массопереноса в пластическом слое, процесс нарастания полукокса – материала с резко отличающейся (более высокой) кажущейся плотностью, можно представить следующим образом. Непрерывно притягивающиеся к поверхности твердеющего остатка на «горячей» стороне пластического слоя пленки пластической массы, пронизанные порами, уплотняются давлением парогазовых продуктов пластического слоя и под действием

температуры отверждаются, образуя новые слои так называемого первичного полукокса.

Для выявления, в какой степени вновь образующиеся слои первичного полукокса могут быть барьером для прохода газов загрузки из пластического слоя, нами были поставлены специальные исследования с использованием печи для определения давления расширения углей в процессе коксования [7]. Были проведены измерения газового давления, температуры, ширины пластического слоя и ширины слоя полукоксо-кокса. Для этого в стальной реторте печи были просверлены отверстия для прохода в угольную загрузку зонда для замера газового давления, чехла термомпары и пластометрической иглы. Несколько большие отверстия напротив указанных были выполнены в изоляционной и огнеупорной кладке печи. С этой стороны нагрев печи был отключен, т.е. коксования проводились при одностороннем нагреве угольной загрузки. Измерение ширины пластического слоя и слоя полукоксо-коксо проводились пластометром, применяемым для замера пластометрических показателей по ГОСТ 1186–87. В связи с тем, что ширина угольной загрузки составила 90 мм, стальную иглу пластометра стандартной длины 55 мм заменили на более длинную – 85 мм того же диаметра (1 мм). Замер газового давления и температуры в коксуемой загрузке проводили по разработанной нами методике [2].

Для исследований были использованы донецкие угли различных марок, характеристика которых представлена в табл. 1.

Динамика газового давления в пластическом слое указанных углей при ширине слоя полукоксо-коксо 40 мм представлена на рис. 1.

Общим в динамике внутрислоевого газового давления является то, что заметный его подъем начинается после прохождения «холодной» границы пластического слоя относительно торца зонда на 2-3 мм. Невысокое давление на этом узком участке – 0,5-1,0 кПа у глей марок Г и ОС и 1-2 кПа у углей марок Ж и К можно объяснить

небольшой интенсивностью выделения летучих веществ в начале пластического состояния и относительно беспрепятственным их прохождением из наружного слоя в исходную угольную загрузку. В то же время

этот участок является достаточно газоплотным, т.к. не позволяет свободно проникать в него газам из участков пластического слоя с более высоким газовым давлением.

Таблица 1

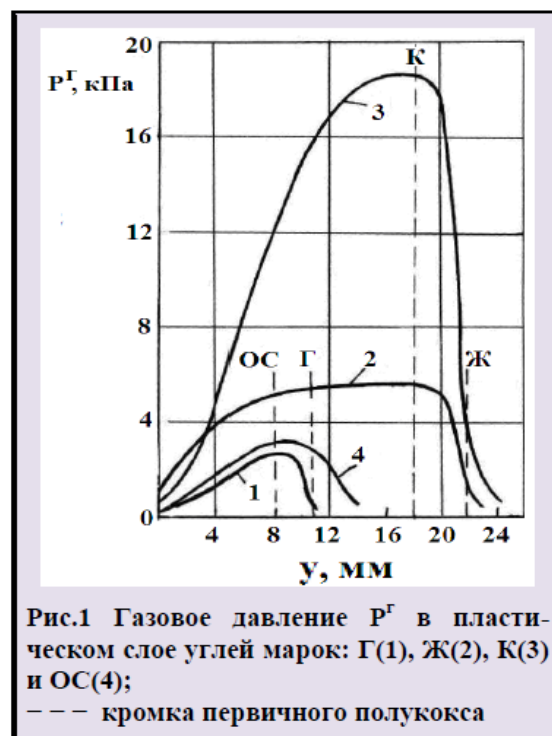
Характеристика исследуемых углей

Уголь (марка, ЦОФ)	Показатели технического анализа, %			Показатели пластометрического анализа по ГОСТ 1186-87, мм	
	A <sup>d</sup>	S <sub>t</sub> <sup>d</sup>	V <sup>d</sup>	x	y
Г, Добропольская	7,8	1,56	35,1	44	11
Ж, Самсоновская	7,6	2,24	31,9	16	22
К, Пролетарская	7,9	1,76	21,8	27	18
ОС, Узловская	8,0	2,09	19,6	23	8

Максимум газового давления у различных углей различен по величине – наибольший он у коксового угля. Угли марок Г и ОС характеризуются наименьшим значением максимума газового давления. Время существования максимума газового давления наибольшее у жирного угля – на протяжении почти всей ширины пластического слоя. Это указывает на высокую однородность пластической массы, а небольшая величина максимума – на значительную ее газопроницаемость из-за малой вязкости. У коксового угля высокий максимум газового давления сочетается с длительным его существованием. Угли марок Г и ОС характеризуются низким внутрипластическим давлением и кратковременным существованием его максимума.

Снижение газового давления в пластическом слое углей марок Г и Ж начинается непосредственно перед слоем первичного полукокса, в тонком слое (1 мм) загустевающей пластической массы, которая при прокалывании пластического слоя пластометром ощущается как более вязкая масса. О наличии «вязкой прослойки», граничащей с первичным полукоксом, указывал еще Л.М.Сапожников [8]. У углей марок К и ОС эта прослойка достигает 2 мм, однако спад максимума газового давления начинается только в слое первичного

полукокса, на расстоянии 2-4 мм от свежеобразованной его кромки.



На основании температурных замеров можно сказать, что спад газового давления в пластическом слое углей марок Г и Ж начинается на 10-15 °С ниже температуры

отверждения пластической массы, а углей марок К и ОС – выше на 15-20 °С. Результаты проведенных замеров показывают, что ни вязкая прослойка пластического слоя, ни слой первичного полукокса марок Г и Ж не являются значительным препятствием для прохождения газов из пластического слоя. Величина газового давления в пластическом слое этих углей определяется только свойствами пластической массы (вязкость, однородность). В отличие от этих углей вязкая прослойка пластического слоя и слой первичного полукокса шириной 2-4 мм углей марок К и ОС являются дополнительным барьером для прохождения газов из пластического слоя, однако дальнейшего роста газового давления здесь не наблюдается. Это значит, что суммарное количество газа, выделяющегося на этом участке и поступающего из пластического слоя, равно эвакуируемому из него. В дальнейших, более нагретых слоях полукокса газовое давление быстро падает. Это указывает на то, что эти слои хорошо газопроницаемы. Принято считать, что появление газопроницаемости связано с развитием трещиноватости в полукоксе.

Пластометрические и температурные замеры позволили идентифицировать слои,

принадлежащие к различным фазам процесса коксования при резком его замораживании (реторту с коксуемой загрузкой помешали в снежно-ледяную смесь). Путем препарирования быстро охлажденной коксуемой загрузки жирного угля были выделены слои различной толщины, принадлежащие вспененной зоне пластического слоя, первичному полукоксу, полукоксу и коксу, и определены их физические свойства. При осторожном соскабливании слоя исходных, а затем и слабо набухших слабо срошенных угольных зерен была вскрыта наружная поверхность «холодной» стороны пластического слоя. Эта поверхность представляет собой плотную корку, из которой частично выступают наружу закоксованные в пластической массе относительно крупные (>2 мм) угольные зерна, еще не перешедшие в пластическое состояние. Видимая пористость в этом слое отсутствует. Толщина этого слоя неравномерна по площади и колеблется от 2 до 3 мм. Именно через этот малогазопроницаемый слой засыпь угля воспринимает давление (распирания) пластического слоя на «холодной» стороне.

Физические характеристики препарированных слоев коксуемой загрузки жирного угля представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Характеристика твердого остатка жирного угля в различных температурных зонах коксуемой загрузки**

Показатель	Температурный диапазон, °С/мм толщины слоя			
	Вспененная зона пластического слоя, 370°-450 °С 10 мм	Первичный полукокс 460-480 °С 3 мм	Полукокс 500-600 °С 14 мм	Кокс 800-900 °С 12 мм
Кажущаяся плотность, г/см <sup>3</sup>	0,636	0,748	0,767	0,892
Действительная плотность, г/см <sup>3</sup>	1,402	1,456	1,470	1,680
Пористость, %	54,5	48,6	47,8	46,9
Структурная прочность, %	18	54	62	78

Данные таблицы показывают, что при переходе от вспененной зоны пластического слоя к слою первичного полукокса резко увеличивается кажущаяся плотность и

структурная прочность, а пористость резко уменьшается. При переходе к полукоксу и далее к коксу эти изменения происходят более плавно. Скачкообразное снижение пористости и повышение структурной прочности при переходе от газонасыщенной пенной зоны к слою первичного полукокса подтверждают протекание процесса массопереноса во вспененной зоне. Увеличение действительной плотности указывает на интенсификацию в конце пластического состояния (в вязкой прослойке или несколько ранее) поликонденсационных процессов. При этом относительно мелкие фрагменты макромолекул соединяются в более крупные агрегаты, что приводит к убыли жидкой фазы и к повышению вязкости пластической массы. Полное ее затвердевание, т.е. образование первичного полукокса, происходит тогда, когда крупные агрегаты срашиваются в макромолекулы, а последние срашиваются между собой. При этом в результате воздействия температуры происходит упорядочение расположения в макромолекулах графитоподобных блоков, что и приводит к повышению действительной плотности материала (см. табл. 2). Следовательно, непосредственно процесс спекания угля происходит в вязкой прослойке пластического слоя и в тонком слое первичного полукокса, граничащем с этой прослойкой. В остальном же пластическом слое происходит термохимическая подготовка угля к спеканию. Снижение газового давления уже в вязкой прослойке пластического слоя углей Г и Ж объясняется быстрым переходом от пластического состояния к первичному полукоксу, способствующем развитию

трещинообразования, и, по-видимому, образованию большого количества открытых пор в первичном полукоксе. При коксовании углей марок К и ОС эти процессы протекают медленнее и поэтому спад газового давления наблюдается в более высоких температурных зонах.

Исследование динамики развития давления распираия, проводившиеся в полупромышленных печах, показывают, что максимум этого давления достигается в основном между вторым и четвертым часами коксования [2, 9-11]. Известно, что главной причиной развития давления распираия является давление в пластическом слое парогазообразных продуктов термического разложения углей. При этом одними исследователями установлено, что внутрипластическое газовое давление  $P^F$  в 1,5-2,0 раза больше давления распираия  $P_{расп}$  [11, 12], тогда как другими получены результаты, согласно которым внутрипластическое газовое давление или существенно меньше давления распираия [13] или равно ему [14]. Вопрос, почему разными авторами получены различные соотношения  $P^F/P_{расп}$  требует изучения, тем не менее, замеры газового давления в пластическом слое при различном его удалении от греющей стенки камеры коксования позволили бы объяснить, почему максимум давления распираия углей достигается в первые часы коксования.

Для изучения динамики изменения максимума газового давления в пластическом слое по мере удаления его от греющей стенки были проведены соответствующие замеры, результаты которых представлены в табл. 3 и на рис. 2.

Таблица 3

**Максимальное газовое давление в пластическом слое и ширина последнего на различном удалении от греющей стенки**

Марка угля	Максимальное газовое давление, кПа/мм ширины пластического слоя, при ширине слоя полукокса-кокса, мм			
	10	30	45	60
Г	1,5/5	2,2/9	2,5/11	2,6/11
Ж	2,3/14	3,2/19	3,4/22	3,3/22
К	4,0/8	15,2/16	18,1/18	18,3/18
ОС	0,7/4	2,0/6	2,8/8	2,8/8

Полученные данные показывают, что чем дальше удален пластический слой от греющей стенки печи, тем больше развиваемое в нем газовое давление, однако до определенного предела. При ширине слоя полукокса-кокса 35-40 мм максимальное газовое давление достигает своих наибольших значений, и далее остается на этом уровне. Это характерно для всех исследованных марок углей. Низкие значения газового давления в пластическом слое, находящемся вблизи греющей стенки печи, объясняется тем, что этот слой еще тонок, а пластическая масса весьма текуча. Это обусловлено высокой скоростью нагрева в упомянутом слое [2].

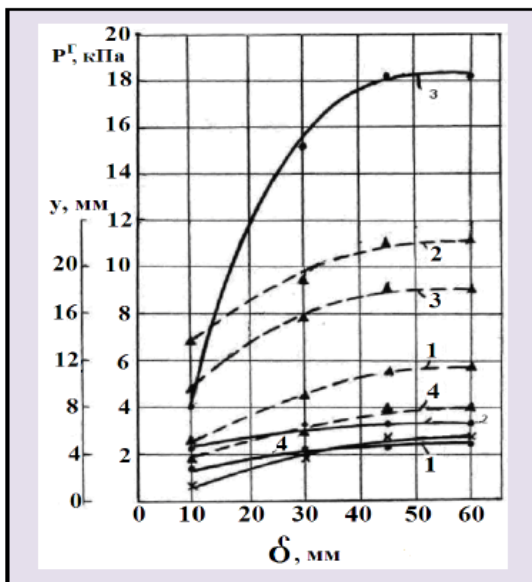


Рис. 2 Внутрипластическое газовое давление  $P^Г$  и ширина пластического слоя  $y$  углей марок Г(1), Ж(2), К(3) и ОС(4) при различной ширине слоя полукокса-кокса  $\delta$

— газовое давление;  
 --- ширина пластического слоя

Кроме того, в тонкой корке кокса в это время происходит интенсивное трещинообразование, определяются формирующие трещины, ограничивающие начинающие расти выпуклости т. наз. «цветной капусты».

В дальнейшем скорость коксования замедляется, ширина пластического слоя увеличивается, повышается вязкость пластической массы и ее однородность, что способствует повышению газового давления в слое, а, следовательно, и давления расприрания. Кроме того, с нарастанием ширины слоя полукокса-кокса влияние трещиноватости, способствующей эвакуации парогазовых продуктов из пластического слоя, уменьшается, так как все больше и больше трещин заканчиваются в массе полукокса от кокса, на все большем удалении от «горячей» стороны пластического слоя. Все это приводит к повышению максимума газового давления в пластическом слое, причем синхронно с увеличением его ширины. При достижении максимальной, остающейся в дальнейшем стабильной, ширины пластического слоя максимальное газовое давление также остается стабильным.

Ширина слоя полукокса-кокса 35-40 мм, при которой развивается максимальное внутрипластическое давление, в промышленных печах достигается между 2 и 3 ч периода коксования [15, 16]. Как указывалось выше, в это же время наблюдается максимум давления расприрания. Динамика давления расприрания разных углей после достижения максимального значения разная, хотя общим для всех углей является более или менее быстрое снижение давления расприрания [2, 9-11]. Это связано с различием процессов усадки и трещинообразования их твердых остатков.

#### Выводы

1. Наличие вспененной зоны пластического слоя не является обязательным для развития большого газового давления в пластическом слое, а, следовательно, и давления расприрания углей.

2. Снижение кажущейся плотности во вспененной зоне пластического слоя обусловлено не только интенсивным газовыделением, но и массопереносом нелетучей массы к слою первичного полукокса, что приводит к

образованию относительно более плотной структуры твердого остатка.

3. Барьером для прохода газов коксования на «холодную» сторону является слой толщиной 2-3 мм размягченных, набухших, вдавненных друг в друга мелких угольных зерен, включающий в себя крупные (> 2 мм) зерна, частично выступающие с наружной стороны слоя. Выступающая их часть представляет собой исходные, не размягченные угольные зерна.

4. Барьер для выхода парогазовых продуктов с «горячей» стороны пластического слоя углей марок Г и Ж отсутствует, величина газового давления в пластическом слое этих углей обусловлена только газопроницаемостью самой пластической массы.

5. Некоторым барьером для эвакуации летучих продуктов с «горячей» стороны пластического слоя углей марок К и ОС является тонкая вязкая прослойка (шириной до 2 мм) на границе с первичным полукоксом и тонкий слой первичного полукокса.

6. Максимум газового давления в пластическом слое увеличивается по мере его удаления от греющей стенки печи синхронно с увеличением его ширины. Наибольших значений максимум газового давления в пластическом слое углей достигает при ширине слоя полукокса-кокса 35-40 мм. В дальнейшем ширина пластического слоя и максимальное газовое давление в нем остаются стабильными. Динамика нарастания максимума давления расpiration сходна для всех исследованных углей и соответствует динамике газового давления в пластическом слое. Характер снижения давления расpiration различных углей после достижения его максимума различный.

при коксовании углей. Сообщение первое. Рентгенографические исследования // УглеХимический журнал. – 2009. – № 5-6. – С. 35-41.

3. Васильев Ю.С., Кузниченко В.М. Способ измерения давления расpiration коксующей угольной загрузки в полупромышленной печи // Кокс и химия. – 1999. – № 6. – С. 16-21.

4. Кузниченко В.М., Лобов А.А., Кривонос В.В. Особенности процесса коксования трамбованных угольных шихт // Кокс и химия. – 1998. – № 6. – С. 9-16.

5. Васильев Ю.С. Развитие теории и практики процессов коксования и обогрева коксовых печей для повышения эффективности производства металлургического кокса / Автореф. дис. докт. тех. наук. – М. – 1991. – 40 с.

6. Скляр М.Г., Васильев Ю.С., Валтерс Н.А. и др. Исследование процесса формирования монолита кокса // Кокс и химия. – 1986. – № 6. – С. 13-17.

7. Кузниченко В.М., Шульга И.В., Сытник А.В. Лабораторный способ определения давления расpiration коксующей угольной загрузки различной насыпной плотности // УглеХимический журнал. – 2007. – № 3-4. – С. 29-33.

8. Сапожников Л.М. Забуряемость коксового тирого при выдаче // Кокс и химия. – 1932. – № 5-6. – С. 41-52.

9. Бабанин Б.И., Шейн С.Ш., Стахеев С.Г. и др. Влияние термической подготовки шихты на давление расpiration // Кокс и химия. – 1988. – № 8. – С. 24-26.

10. Сухоруков В.И., Стахеев С.Г. и Шведов В.И. О механизме возникновения и развития давления расpiration // Кокс и химия. – 1997. – № 10. – С. 9-12.

11. Луазон Р., Фош П., Буайе А. Кокс. Пер. с франц. – М.: Металлургия. – 1975. – 520 с.

12. Кушниревич Н.Р. Изменение величины давления расpiration при коксовании в генетическом ряду донецких углей // Труды УХИИ. М.: Металлургиздат. – 1948. – Вып. 1. – С. 43-58.

13. Браун Н.В. Полупромышленные коксования шихт, уплотненных трамбованием // Кокс и химия. – 1987. – № 8. – С. 12-18.

#### Библиографический список

1. Дроздник И.Д., Дюканов А.Г., Бессчастный Ю.В., и др. Некоторые аспекты подготовки углей для коксования // УглеХимический журнал. – 2007. – № 3-4. – С. 13-20.

2. Кузниченко В.М., Сытник А.В. Процесс развития максимального давления расpiration

14. Карч А. Давление всучивания. Часть 1. Методы измерения давления всучивания и давления внутри шихты. // Карбо. – 2001. – Т. 46. – № 5. – С. 163-168.

15. Еркин Л.И. Анализ процесса формирования кускового кокса // Кокс и химия. – 1970. – № 9. – С. 13-21.

16. Кривонос В.В., Дзекунов С.Н., Кузниченко В.М. и др. Особенности прогрева трамбованного угольного пирога в коксовой печи // Кокс и химия. – 1998. – № 3-4. – С. 15-20.

Рукопись поступила в редакцию 11.11.2009