

## Summary

Filatov Yu., Yemchenko A., Popov V., Dreyko A., Yaroshevsky S., Ivleva T.

Improvement and increasing of efficiency of iron production technology on basis of pulverized coal injection (PCI)

The complex improvement of technological conditions of blast-furnace smelting on basis of principle of full and complex compensation, which includes usage of low-sulphur pulverized coal, coke «Premium», the change of sinter with pellets, allowed to reject the usage of natural gas and to reduce the coke consumption to 400-450 kg/thm with saving or improvement of furnace productivity and iron quality.

## Keywords

blast furnace, pulverized coal, pellets, «Premium» coke

УДК 669.162.2

**В. В. Кочура, С. Л. Ярошевский, В. Е. Попов\*, В. И. Купенко, А. В. Храпко\*, С. А. Иванов\*, В. В. Брага\***

Донецкий национальный технический университет, Донецк

\*ПрАО «Донецксталь» – металлургический завод», Донецк

## Исследование полноты сгорания пылеугольного топлива в доменной печи № 1 ПрАО «Донецксталь» — металлургический завод»

Приведены исследования полноты сгорания пылеугольного топлива (ПУТ), вдуваемого в горн доменных печей, на основании петрографического анализа продуктов доменной плавки.

**Ключевые слова:** уголь, ПУТ, кокс, колошниковая пыль, шлак, доменная печь

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что одним из важнейших условий вдувания больших расходов пылеугольного топлива в доменную печь является обеспечение его полного сгорания в пределах фурменных зон. Поэтому изучение степени газификации ПУТ представляет важную задачу.

Методика исследования полноты сгорания ПУТ в доменной печи по анализу продуктов плавки основана на идентификации и количественной оценке несгоревших частиц углерода ПУТ, вынесенных из доменной печи в составе колошниковой пыли, шламов и шлака. Указанная методика опробована и применяется в отечественной и зарубежной практике [1-4].

Исследование полноты сгорания ПУТ, проведенное с использованием петрографического анализа продуктов плавки на мощных (более 4000 м<sup>3</sup>) доменных печах комбината Баостил (Китай), показывает неполноту сгорания ПУТ 1,1 и 2,6 % при вдувании в горн 178 и 240 кг ПУТ на 1 т чугуна: при этом степень замены кокса ПУТ составляла около 40 %, на 1 т чугуна расходовалось менее 300 кг кокса, неполнота сгорания увеличивалась до 2,6 % при вдувании ПУТ 240 кг/т чугуна и еще не препятствовала устойчивой и производительной работе доменной печи [2].

Целью статьи является определение полноты

сгорания ПУТ в доменных печах на основании петрографического анализа продуктов доменной плавки.

Для определения степени сгорания ПУТ на доменной печи № 1 (ДП-1) доменного цеха «Донецксталь» – МЗ в мае 2010 г. использовали петрографический анализ содержания несгоревших частиц ПУТ в продуктах доменной плавки – колошниковой пыли, шламе и шлаке.

Суть метода подробно изложена в работе [4] и состоит в определении частичек углерода кокса и ПУТ, которые имеют различную форму и размеры, в продуктах доменной плавки с помощью петрографического анализа с применением методов рудной микроскопии и углепетрографии.

Доменная печь в указанный период эффективно работала на окатышах СевГОК (1557 кг/т чугуна): производительность печи составляла 2000 т/сутки, расход (в кг/т чугуна) кокса «Премиум» – 422; ПУТ – 135, железоблюса – 64, известняка – 147.

Во время эксперимента вдували ПУТ из смеси газового и тощего угля в соотношении 3/2. Качество ПУТ характеризуется высокой тониной помола, стабильным техническим анализом (в %: А = 10,35, S = 0,99, W = 1,58, ЛВ = 30). Средний медианный размер частиц ПУТ (в мкм) составлял 35: >80 – 13,77 %; 63-80 – 8,9 %; 0-63 – 77,83 %).

Чтобы провести петрографические исследования, изготавливали брикеты из шлама газоочистки и колошниковой пыли, отобранных в мае 2010 г. Для сравнения были изготовлены также брикеты из угольной пыли и кокса. Кроме того, исследовали аншлифы из образцов шлака, отобранных в тот же период.

Объектом исследования являлся полированный шлиф площадью 1-2 см<sup>2</sup>, изготовленный на основе эпоксидной смолы из пробы анализируемого материала (угля, кокса, колошниковой пыли, шлама и шлака).

Химический анализ продуктов плавки – проб шлака, шлама, колошниковой пыли и пылеугольного топлива, взятых для исследования полноты сгорания ПУТ на ДП № 1 «Донецксталь» – МЗ», – приведен в табл. 1-3.

Микроструктура шлифов колошниковой пыли и ПУТ показана на рисунке.

Петрографический анализ выполняли с применением методов рудной микроскопии и углеродпетрографии. Использовали рудный поляризационный микроскоп МИН-9 с микрофотометрическим устройством ФМЭ-1. Рудные, шлакообразующие и углеродсодержащие компоненты определялись по ряду оптических признаков (отражательная способность, цвет, двуотражение, эффекты поляризации, внутренние рефлексии), а также по микротвердости.

Отражательная способность ( $R_o$ ), визуально воспринимаемая как яркость компонента в полированном брикете, численно равна отношению интенсивности отраженного света ( $I_o$ ) к интенсивности падающего света ( $I_n$ ).

Двуотражение характерно для анизотропных кристаллов. При изменении ориентировки плоскости поляризации света относительно кристаллографических направлений отражательная способность меняется (особенно ярко это свойство проявляется у графита).

С введением дополнительного поляроида (анализатора) между объективом и окуляром заметна и очень слабая анизотропия (эффекты поляризации). При этом наблюдается цвет просвечивающих компонентов, обычно серых в отраженном свете (внутренние рефлексии).

Таблица 1

**Химический анализ шлаков и соответствующих им чугунов, взятых для исследования полноты сгорания ПУТ**

Наименование	Шлак		
	№ 1 (16.05.2010)	№ 2 (19.05.2010)	№ 3 (30.05.2010)
[Si]	0,51	0,62	0,65
[Mn]	0,10	0,10	0,10
[S]	0,03	0,04	0,03
[P]	0,02	0,02	0,03
(SiO <sub>2</sub> )	38,80	36,90	39,10
(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5,80	5,70	5,80
(CaO)	45,10	45,20	43,80
(MgO)	6,70	6,80	7,20
CaO/SiO <sub>2</sub>	1,16	1,22	1,12

Таблица 2

**Химический анализ проб шлама и колошниковой пыли, взятых для исследования полноты сгорания ПУТ**

Наименование	Шлам № 1 (1-10 мая 2010 г.)	Колошниковая пыль № 1 (1-10 мая 2010 г.)	Шлам № 2 (16-31 мая 2010 г.)	Колошниковая пыль № 2 (16-31 мая 2010 г.)
SiO <sub>2</sub>	7,20	5,10	8,60	11,30
CaO	6,20	3,40	4,50	6,60
MgO	0,80	0,40	0,60	0,90
MnO	0,168	0,19	0,154	0,18
Fe <sub>общ</sub>	55,20	55,10	54,90	42,20
FeO	11,50	10,60	8,80	9,00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	63,50	66,20	63,70	49,60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,25	0,20	0,38	0,85
ППП	3,50	14,70	3,90	19,00
TiO <sub>2</sub>	0,42	0,56	0,72	0,56
C	3,50	14,40	3,50	16,10
S	0,42	0,12	0,72	0,169
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,36	0,16	0,16	0,16
Na <sub>2</sub> O	0,21	0,34	0,07	0,23
K <sub>2</sub> O	0,24	0,70	0,11	0,46
Zn	0,11	0,13	0,18	0,13

Таблица 3  
Технический анализ ПУТ на ДП № 1 ПрАО «Донецк-сталь» – МЗ», 2010 г.

Наименование	№ 1 (1.05–10.05)	№ 2 (16.05–31.05)
A	10,5	10,5
ЛВ	28,8	28,4
S	1,02	1,02

Морфология частиц кокса определяется макро- и микропористостью. Размер пор соответственно колеблется от миллиметров и долей миллиметров до микрон. Они почти полностью сложены поликристаллическими агрегатами графита с размером частиц в несколько микрон. Кокс содержит большое количество обломков аналогичного состава скрытокристаллической структуры с субмикроскопической зернистостью (выглядят изотропными), а также включения шлакообразующих компонентов и фрагментов с реликтовой клеточной структурой. Часть пустот покрыта корочками перекристаллизованного графита толщиной в сотые доли миллиметра.

Отражательная способность графита  $R_0 = 22\%$ , двуотражение очень сильное, с изменением цвета от коричневатого до сине-серого.

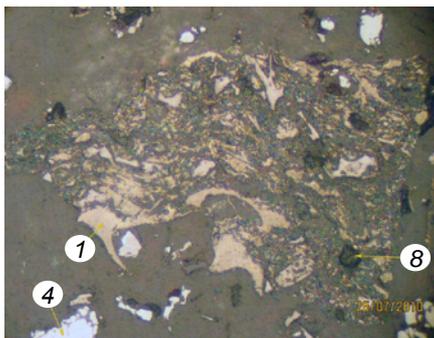
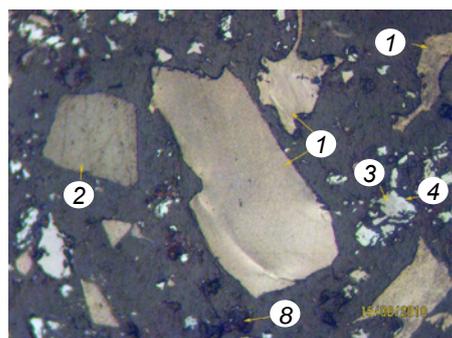
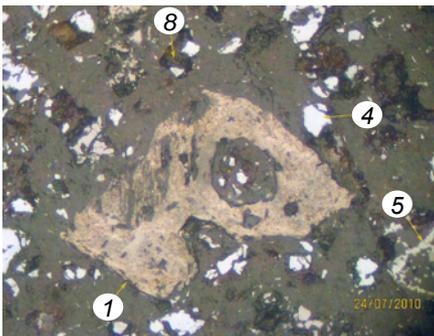
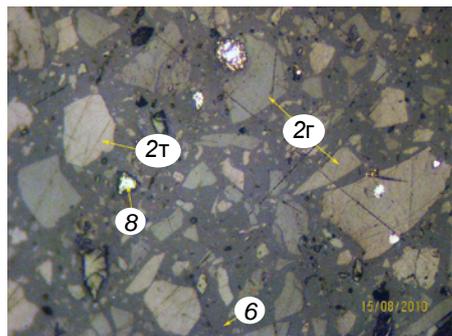
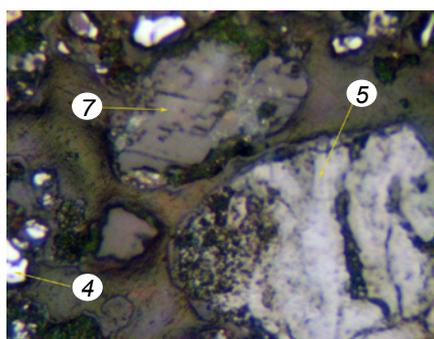
Термическое воздействие приводит к графитиза-

ции частиц кокса с поверхности и образованию новых пор.

Частицы пылеугольного топлива сложены бесструктурным витринитом – однородным гелефицированным изотропным компонентом. Изредка встречается структурный витринит, содержащий остатки растительной структуры. Форма частиц – угловатая, с количеством сторон от трех до пяти и сравнительно ровными ограничениями. Поры отсутствуют.

Отражательная способность зависит от марки угля. Отражательная способность витринита угля ( $R_0$ ) по ГОСТу Украины 1996 г. составляет: для газового угля 7,3-8,8 %; для тощего – 10,1-12,3. По этому показателю, а также по изотропности он существенно отличается от кокса. На рисунке визуальное прослеживается отличие газового угля от тощего по отражательной способности (тощий уголь кажется светлее). По причине низкой твердости частицы угля выделяются среди других компонентов обилием тонких царапин, от которых трудно избавиться при полировке.

Существенное значение имеет сравнительно широкий диапазон значений  $R_0$  при небольшом разрыве между марками угля. В процессе дегазации потеря летучих компонентов сопровождается изменением  $R_0$ . Изменение угля марки Т при нагревании похоже



Микроструктура ПУТ и колошниковой пыли (размер кадра по горизонтали составляет 0,125 мм): 1 – кокс; 2 – уголь; 2т – уголь тощий; 2Г – уголь газовый; 3 – магнетит; 4 – гематит; 5 – силикаты; 6 – оксидная матрица; 7 – карбонаты; 8 – поры; 9 – металл

на преобразование кокса с графитизацией и увеличением отражательной способности. На определенной стадии он может приблизиться к коксу по оптическим свойствам. При этом сохраняются отличия от кокса по особенностям микроструктуры и морфологии. Такой уголь следует отнести к частично использованному.

Частично использованный уголь марки Г отличается пониженной по сравнению с исходным отражательной способностью. Возможно, на ранней стадии преобразования потеря летучих компонентов и термическая диссоциация ведут к формированию субмикроскопических пор, понижающих этот показатель. Подобное явление наблюдается на конечных стадиях преобразования кокса.

Рудные компоненты представлены магнетитом  $Fe_3O_4$  и гематитом  $Fe_2O_3$ . Магнетит чаще всего образует сростки неправильных зерен размером 30 мкм и менее. Включения магнетита в стеклообразных образованиях имеют вид правильных кристаллов, замещаемых гематитом (рисунок). Гематит количественно преобладает над магнетитом.

Шлакообразующие компоненты представлены остаточным кварцем, карбонатами, а также силикатами. Последние образуют правильные кристаллы в массе силикатного стекла, образующего и самостоятельные частицы. Отражательная способность этих компонентов варьируется в зависимости от содержания железа.

Стеклообразные частицы могут иметь отражательную способность, близкую к нулю. Однако они отличаются серыми или ярко-красными (за счет оксидов железа) внутренними рефлексами, в то время как в угле они не наблюдаются. Существуют и морфологические отличия.

Все перечисленные компоненты встречаются как в виде отдельных частиц, так и плотных комочков, составляющих единый агрегат. По всей вероятности, это осколки железорудных окатышей.

Объемные проценты указанных компонентов определены линейным методом. Этот метод основан на том, что отношения площадей, занимаемых сечениями зерен в плоскости шлифа, пропорциональны

Таблица 4

**Содержание основных компонентов в шламе газоочистки на ДП № 1 «Донецксталь» – МЗ, объемные %**

Номер пробы	Часть брикета	Кокс	Уголь	Оксиды железа	Шлакообразующие компоненты
Без номера 1-10 мая 2010 г.	А	2,08	–	64,79	33,13
	Б	2,61	–	67,80	29,59
	среднее	2,34	–	66,30	31,36
1 16,27,29 мая 2010 г.	А	3,65	0,01	75,28	21,06
	Б	3,50	0,01	74,07	22,42
	среднее	3,57	0,01	74,68	21,74
2 18,23,24,30 мая 2010 г.	А	2,93	–	65,75	31,32
	Б	3,57	0,03	72,93	23,47
	среднее	3,25	0,015	69,35	27,39
1, 2	среднее	3,41	0,012	72,02	24,56

Таблица 5

**Содержание основных компонентов в колошниковой пыли на ДП № 1 «Донецксталь» – МЗ, объемные %**

Номер пробы	Часть брикета	Кокс	Уголь	Оксиды железа	Шлакообразующие компоненты
Без номера 1-10 мая 2010 г.	А	18,68	0,19	46,93	34,20
	Б	23,53	0,14	39,52	36,81
	среднее	21,10	0,16	43,24	35,50
1 16, 27, 29 мая 2010 г.	А	28,73	0,05	34,91	36,31
	Б	26,80	0,07	34,79	38,35
	среднее	27,76	0,06	34,84	37,34
2 18, 23, 24, 30 мая 2010 г.	А	33,69	0,13	37,79	28,39
	Б	28,22	0,06	36,74	34,98
	среднее	30,96	0,09	37,27	31,69
3 19, 20, 22, 31 мая 2010 г.	А	29,74	0,12	35,44	34,71
	Б	33,46	0,19	36,88	29,47
	среднее	31,60	0,15	36,16	32,09
1, 2, 3	среднее	30,11	0,10	36,09	33,70

отношению длин линий, пересекающих эти сечения. В свою очередь, отношения площадей сечений пропорциональны отношению объемов зерен. Измерения проводились с применением окуляра – микрометра. Брикет перемещали при помощи координатного препаратоводителя, снабженного линейками с нониусами, так, чтобы измерение сечений зерен выполнялось по системе параллельных линий через 1 мм.

Результаты подсчетов основных компонентов, содержащихся в шламе газоочистки и колошниковой пыли, отобранных на доменной печи № 1, приведены в табл. 4, 5. Сходимость результатов контролировалась измерениями на двух половинах брикетов, А и Б. Из табл. 4 видно, что в шламе газоочистки преобладают оксиды железа (до 72 %) и шлакообразующие (до 25 %). Содержание кокса и угля составляет 3,4 и 0,012 %.

В колошниковой пыли (в %) примерно одинаковое количество оксидов железа (36), шлакообразующих компонентов (34) и кокса (30). Содержание частиц угля в колошниковой пыли на порядок выше, чем в шламе, и составляет 0,1.

Химический анализ проб шлама и колошниковой пыли (табл. 5) качественно подтверждает меньшее количество углерода в шламе (3,5 %) по сравнению с углеродом колошниковой пыли (14-16 %).

Анализ результатов подсчета показывает удовлетворительную сходимость данных.

Размер частиц шлама газоочистки, независимо от их состава, колеблется от долей микрон до 5 мкм. Частицы колошниковой пыли крупнее – до 50 мкм; небольшая часть достигает размеров 80-100 мкм.

Углеродсодержащие компоненты в шлаке не обнаружены. Стекловатая масса содержит поры размером от долей микрон и крупнее, а также тончайшие капельки металла. Наблюдается начало процесса рекристаллизации в виде тончайших дендритов и ростков удлиненных кристаллов силикатов.

Исследования полностью подтвердили выводы

субъективного анализа и наблюдений, свидетельствующих о высокой степени газификации ПУТ в доменной печи: об этом свидетельствуют высокий уровень основных ТЭП плавки, минимальные простои и горение воздушных фурм, достаточные стабильность и устойчивость технологического процесса.

Особенности работы доменной печи при низкой степени газификации ПУТ детально описаны в технической литературе [5-7].

Петрографические исследования показали, что содержание углерода ПУТ в шлаке – следы; в колошниковой пыли – 0,1 и шламе – 0,012 % (объемные). То есть, свыше 99 % углерода ПУТ газифицируется в доменной печи, что является существенным достижением.

Принимая во внимание изложенное, очевидно, что в сложившихся на «Донецксталь» – МЗ» технологических условиях полнота газификации ПУТ не является регламентирующим элементом технологии. Определяющим элементом технологии в настоящее время остается газодинамика печи, недочетами которой являются значительный выход горновых газов на 1 т чугуна, низкое давление газов печи, большой расход известняка на 1 т чугуна и, что главное – невысокое качество (по прочности и содержанию мелочи 0-5 мм) окатышей СевГОК.

### Выводы

Проведенные петрографические исследования полноты сгорания ПУТ на доменной печи № 1 ПрАО «Донецксталь» – МЗ» по анализу продуктов доменной плавки говорят о достаточно полной – 99 % (объемные) – степени газификации частиц угля при расходах ПУТ 135 кг/т чугуна.

Опыт «Донецксталь» – МЗ» показывает, что освоение пылеугольной технологии при расходе ПУТ 100-150 кг/т чугуна и снижение расхода кокса до 400 кг/т чугуна для условий доменных печей Украины не представляются проблематичными.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Research of utilization factor of injected pulverized coal into BF at large PCI Rate / K. Wu, W. Pan, W. Hu, et al. // Steel Research Int. – 2008. – № 12. – P. 904-907.
2. Technology progress and strategy in blast furnace ironmaking in China / F. Shen, T. Yang, B. Gao // Steel Research International. – 2005. – V. 76. – № 10. – P. 676-682.
3. Research on unconsumed fine coke and pulverized coal of BF dust under different PCI rates in BF at Capital Steel Co. / K. Wu, R. Ding, Q. Han, et al. // ISIJ International, 2010. – Vol. 50. – № 3. – P. 390-395.
4. Определение степени сгорания пылеугольного топлива в доменной печи № 2 ЗАО «Донецксталь» – металлургический завод / В. В. Кочура, С. Л. Ярошевский, В. И. Купенко и др. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Металургія. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. – Вип. 12 (177). – С. 56-65.
5. Применение пылеугольного топлива для выплавки чугуна / С. Л. Ярошевский, А. И. Рябенко, А. Л. Антонов и др. – Киев: Техника, 1974. – 186 с.
6. Ярошевский С. Л. Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива. – М.: Металлургия, 1988. – 176 с.
7. Бабич А. И. Интенсификация использования пылеугольного топлива в доменной плавке / А. И. Бабич, С. Л. Ярошевский, В. П. Терещенко. – Киев: Техника, 1993. – 200 с.

## Анотація

Кочура В. В., Ярошевський С. Л., Попов В. Є., Купенко В. І., Храпко А. В.,  
Іванов С. А., Брага В. В.

Дослідження повноти згорання пиловугільного палива в доменній печі № 1  
ПрАТ «Донецьксталь» – металургійний завод»

Наведено дослідження повноти сгорання пиловугільного палива, що вдувається до горна доменних печей, за петрографічним аналізом продуктів доменної плавки.

## Ключові слова

вугілля, ПВП, кокс, колошниковий пил, шлак, шлак, доменна піч

## Summary

Kochura V., Yaroshevsky S., Popov V., Kupenko V., Khrapko A., Ivanov S., Braga V.  
Investigations of pulverized coal combustion efficiency in blast furnace № 1  
of JSC (Private) «Donetskstal» – Iron and Steel Works»

Investigation of pulverized coal combustion being injected into hearth of the blast furnaces with petrographic analysis of blast furnace melting products was described.

## Keywords

coal, PC, blast furnace dust, sludge, slag, blast furnace

УДК 669.162.267.642

**Б. П. Крикунов, В. П. Ивлев, В. Е. Попов, С. А. Иванов, А. И. Дрейко, А. В. Храпко,  
Н. Ф. Анищенко\*, А. М. Зборщик\*, А. В. Дидевич\*, В. П. Стец\*, М. В. Рыжов\*\***

ПрАО «Донецксталь» – металлургический завод», Донецк

\*Донецкий государственный научно-исследовательский институт черной металлургии, Донецк

\*\*ЧАО «НПП „Техмет“», Донецк

## Исследование десульфурации чугуна рафинирующей смесью ИРС-2 при выпуске в 100-тонные ковши

Проанализированы результаты исследования десульфурации чугуна рафинирующей смесью ИРС-2 во время выпуска в 100-тонные чугуновозные ковши, проведена оценка экономической эффективности работы доменной печи № 2 ПрАО «Донецксталь» – металлургический завод» на шлаках низкой основности с последующей десульфурацией чугуна смесью ИРС-2.

**Ключевые слова:** чугун, внедоменная десульфурация, рафинирующая шлакообразующая смесь ИРС-2

Известно, что работа доменных печей (ДП) на шлаках пониженной основности дает возможность снизить себестоимость чугуна за счет уменьшения удельных расходов кокса, известняка и увеличения производительности печи. Однако при работе печей на коксе, полученном из высокосернистых углей Донбасса, по мере понижения основности печного шлака содержание серы в чугуне увеличивается. При этом увеличивается количество чугуна, который должен подвергаться внедоменной десульфурации из-за превышения содержания в нем серы сверх допустимого ГОСТ уровня.

Производительность установки внедоменной десульфурации чугуна доменного цеха ПрАО «Донецксталь» – металлургический завод» в настоящее время

не позволяет регулярно проводить обработку больших масс металла. Альтернативным решением может быть десульфурация чугуна рафинирующей смесью ИРС-2 на литейных дворах ДП.

Сведения о химическом составе смеси ИРС-2 и результаты ее использования для обработки чугуна на литейных дворах ДП при выпуске плавки в 140-тонные чугуновозные ковши приведены в работах [1, 2]. Показано, что решающее влияние на эффективность десульфурации металла оказывает величина основности шлака в чугуновозных ковшах, которая определяется состоянием подаваемых под обработку ковшей и удельным расходом рафинирующей смеси. Кроме того, на результаты обработки влияют продолжительность и интенсивность перемешивания