

УДК 669.162.266.446

© Кравченко В.П.\*

**АНАЛИЗ СПОСОБОВ ГРАНУЛЯЦИИ ШЛАКОВЫХ РАСПЛАВОВ  
И ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА КАЧЕСТВО ГРАНИШЛАКА**

*В результате проведенного анализа было установлено, что существующие способы грануляции шлакового расплава не обеспечивают получение качественного гранишлака по физико-механическим характеристикам: остаточной влажности, показателю ВУС, плотности зерна и фракционному составу, что снижает потребительские качества конечного продукта. Установлено, что применение воздушного дутья для диспергирования расплава влияет на фракционный состав и форму зерен гранишлака: содержание фракций менее 1,25 мм уменьшается до 49,1% против 92,8% в обычном, содержание зерен сферической формы составляет 33% с плотной поверхностью, что способствует снижению остаточной влажности гранишлака. Применение воздушного дутья при грануляции шлаков является эффективным для получения качественного гранишлака, что может быть использовано при разработке новой технологии грануляции шлакового расплава.*

**Ключевые слова:** гранулированный шлак, дисперсность, воздушное дутье, влажность, грануляционный метод, форма зерна, фракция.

**Кравченко В.П.** *Аналіз способів грануляції шлакових розплавів і факторів, що впливають на якість гранишлака. В результаті проведеного аналізу було встановлено, що існуючі способи грануляції шлакового розплаву не забезпечують отримання якісного гранишлака за фізико-механічними характеристиками: залишковою вологістю, показником ВУС, щільності зерна і фракційним складом, що знижує споживчі якості кінцевого продукту. Встановлено, що застосування повітряного дутьтя для диспергування розплаву впливає на фракційний склад і форму зерен гранишлака: зміст фракцій менше 1,25 мм зменшується до 49,1% проти 92,8% у звичайному, вміст зерен сферичної форми становить 33% з щільною поверхнею, що сприяє зниженню залишкової вологості гранишлака. Застосування повітряного дутьтя при грануляції шлаків є ефективним для отримання якісного гранишлака, що може бути використано при розробці нової технології грануляції шлакового розплаву.*

**Ключові слова:** гранульований шлак, дисперсність, повітряне дутьтя, вологість, грануляційний метод, форма зерна, фракція.

**V.P. Kravchenko.** *Slag melt granulation and factors affecting the quality of Granulated slag. An analysis of the state of slags recycling in foreign countries was carried out. A modern principle was put forward in the article: blast furnace is an apparatus for manufacturing of two basic types of products : cast iron and slag. Granulation, as the primary recycling of slag melt fixes the structure with certain properties at rapid cooling. An analysis of the existing methods of granulation was carried out and factors influencing the quality of granular slag were determined, as well as the ways of obtaining granular slag with the required physical and mechanical characteristics. The main factors of granulated slags quality, employed for manufacturing of binding materials are chemical composition and the structure of fine granulated particles. All wet methods of granulation are characterized by high humidity of granulated slag, its value reaching 24,5%, due to increase in granules' porosity. Real options for reducing humidity of granulated slag may include: development of the process of granulation, ensuring manufacturing of products with increased density and low content of fine fractions, dehydration of slag in high bunkers and stacks at sufficient soaking time and slag blowdown with a stream moving downwards. Using mechanical granulators and gaseous energy carriers (air) for melt's dispersion is an efficient way of reducing water consumption for granulation (semi-dry or*

\* канд. техн. наук, ЧП «Эра плюс», г. Мариуполь

*dry methods of granulation). It also makes it possible to reduce r consumption of water, supplied for granulation from 3,0 to 0,7-1,5m<sup>3</sup>/min. Application of air blast for melt's dispersion influences its fractional composition and grain shape in the slag: the content of the fraction less than 1,25mm reduces to 49,1%, as compared to conventional 92,8%. The content of spherical grains is with tough surface is 33%, it promoting reduction of residual humidity of granulated slag. Thus, application of air blast for granulation of slags is an efficient way of obtaining high quality granulated slag.*

**Keywords:** *granulated slag, dispersion, air blast, humidity, granulation methods, grain shape, fraction.*

**Постановка проблеми.** Как известно, доменные шлаки являются побочным продуктом (отходом) производства чугуна в доменных печах. Увеличение производства чугуна вызывает неизбежный рост выпуска доменных шлаков, в сравнении составляющих 45-60% от выпуска чугуна [1]. На долю доменных шлаков приходится более 70% от общего количества полученных в металлургическом производстве шлаков. Переработка шлаков с целью его дальнейшего использования является важной научно-практической задачей. При этом качество граншлака, получаемого по существующим технологиям грануляции шлакового расплава, не всегда отвечает требованиям переработчиков. Поэтому необходима разработка нового технологического процесса грануляции, который будет основываться на анализе недостатков существующих способов грануляции факторов, влияющих на качество граншлака.

**Анализ последних достижений и публикаций.** В прошлом столетии практика использования доменных шлаков базировалась преимущественно на классических исследованиях Лангена, Михаэлиса, Пассова, Грюна, Гутмана и др. [2]. Последние годы, на рубеже XXI столетия, можно характеризовать, как этап интенсивных научных исследований, опытных и проектных изысканий, результаты которых к настоящему времени представляют солидную теоретическую базу для организации современного и полного практического использования доменных шлаков.

Переработка и использование шлаков, одного из самых объемных отходов металлургического производства, колеблется от 50 до 100% [3].

В сравнении с зарубежными странами (США, ФРГ, Франция, Англия) проблемой переработки и использования шлаков наша металлургия занимается в меньшей степени. Ценный продукт доменного процесса – шлак, эффективно используемый в качестве сырья в ряде самостоятельных производств, в металлургии зачастую рассматривается как отброс, подлежащий уборке от доменных печей. В результате неиспользованные доменные шлаки складываются в отвалах, в которых в нашей стране накоплено свыше 2 млрд.т., негативно влияющих на экологию окружающей среды.

Для исключения или существенного снижения вредного техногенного воздействия на экологию необходимо внедрение прогрессивных технологических процессов, обеспечивающих использование малоотходных и безотходных технологий, исключающих любые виды отходов, путем широкого их использования в качестве вторичного сырья [4].

Внедрение новых технологий по полной переработке и использованию доменных шлаков должно сопровождаться усвоением нашими металлургами современного принципа: доменная печь как агрегат комплексного производства двух основных видов продукции – чугуна и шлака.

Металлургические шлаки по своему химическому составу и физико-химическим свойствам не только не уступают, но в ряде случаев превосходят качества заменяемых ими природных материалов. Например, суммарное содержание оксидов кальция, железа и кремния в шлаках достигает 75% [5, 6]. Это предопределяет широкие перспективы использования металлургических шлаков. Если раньше ставилась задача, в принципе, организовать переработку шлаков и довести ее до определенного уровня, то в настоящее время, учитывая современные требования по охране окружающей среды, стоит задача отработки технологических процессов, исключающих выбросы вредных веществ в атмосферу.

Использование научно-технических разработок, их теоретический анализ, а также обобщение опыта зарубежных и передовых предприятий по переработке шлаков сыграет важную роль в проблеме создания усовершенствованной безотходной технологии в черной металлургии. Получение качественного граншлака является одним из звеньев в решении этой задачи.

**Цель работы** – Провести анализ существующих способов грануляции шлакового распла-

ва и факторов, влияющих на качество граншлака, для решения вопроса необходимости разработки новой усовершенствованной технологии, в которой должны быть учтены недостатки существующих способов грануляции шлаковых расплавов.

**Изложение основного материала.** Грануляция шлаков является операцией, фиксирующей, образующуюся при быстром охлаждении шлакового расплава, мелкозернистую структуру в стеклообразном состоянии, закрепляющей активные гидравлические свойства, потенциально присущие шлакам определенного химического состава, которые становятся пригодными для употребления в качестве гидравлической добавки в шлако-портландцементном производстве и некоторых других отраслях промышленности.

Ценные свойства, а также особенности технологии получения гранулированного шлака, связанные с быстрым охлаждением больших масс расплава, определили его ведущее положение среди других видов шлаковых материалов.

Гранулированный шлак начали получать еще в 19-ом столетии, охлаждая расплавленный шлак водой. В дальнейшем способы грануляции развивались и совершенствовались. В зависимости от способа грануляции шлака одной и той же плавки, одной шихты и одинакового химического состава приобретают различные свойства и структуру, различную величину зерен, объемный вес, способность размалываться и гидравлические свойства, выраженные в разной степени и влияющие различно на качество вяжущего материала и других видов продукции.

Для доменного производства грануляция в настоящее время имеет значение вспомогательного, связанного с ним технологически, экономически и территориально, процесса, сочетающего в себе обработку и уборку шлаков от доменных печей.

Основными факторами качества гранулированных шлаков для производства вяжущих материалов, в частности шлако-портландцементов, являются химический состав и совершенство грануляции. Эти факторы в различном их сочетании полностью определяют пригодность шлаков в качестве цементного сырья.

В связи с имеющей место тенденцией металлургов работать с меньшим расходом флюсов и на менее основных и более горячих шлаках при форсированном ходе доменной печи, качество шлаков по химическому составу с точки зрения цементника из года в год ухудшается. Поэтому совершенствование грануляции при обычно посредственных по составу шлаках приобретает значение решающего фактора.

Отсюда, вполне очевидно, важное значение, которое приобретает в современных условиях выбор оптимального способа грануляции доменных шлаков. Это вполне коррелируется с принципом, согласно которому шлаки должны рассматриваться не как отход, а наряду с металлом как основная продукция, подлежащая дальнейшей переработке, как сырье для получения продукции для различных отраслей.

Существующие способы грануляции шлака связаны с его увлажнением избыточным количеством воды и требуют последующего обезвоживания. Влажность гранулированного шлака – одна из важнейших его характеристик. Ее повышенное значение приводит к большим затруднениям в зимнее время из-за смерзания шлака в вагонах. Вода является балластом при транспортировке шлака и требует расхода дефицитного топлива на ее выпаривание при производстве шлако-портландцемента.

Влажность шлака зависит от способа и продолжительности его обезвоживания и в значительной степени обусловлена способностью удерживать воду в порах и межзеренных пустотах. Вододерживающая способность (ВУС) характеризуется отношением массы удерживаемой воды к массе сухого шлака и обусловлена совокупностью его физико-механических характеристик, зависящих от технологии грануляции. В таблице приведены физико-механические характеристики граншлака в зависимости от способа грануляции. Взяты усредненные значения из источника [3].

При барабанном способе шлаковый расплав и вода поступают на вращающийся барабан, шлак дробится и отбрасывается лопастями барабана на склад, охлаждаясь в полете. Такая технология приводит к формированию округлых, сравнительно крупных и плотных гранул с низким значением ВУС и влажности (29,2 и 8,4% соответственно).

Гидрожелобной способ характеризуется интенсивным дроблением и охлаждением расплава мощным потоком воды, благодаря чему продукция содержит много мелких зерен (41,5%) и обладает повышенной ВУС (39,7%).

Таблица

Влияние способа грануляции на физико-механические свойства граншлака

п/п	Наименование показателей	Способы грануляции		
		барабанный	гидрожелобной	желобной
1.	Влажность, %	8,4	11,3	24,5
2.	Насыпная масса шлака, кг/м <sup>3</sup> : влажного сухого	1075	945	630
		1125	1070	535
3.	Содержание фракций, мм: Свыше 10 2,5 – 10 1,25 – 2,5 0 – 1,25	7,8	18	6,1
		39,7	26,1	52,2
		28,6	30,2	8,3
		23,7	41,5	23,1
4.	ВУС, %	29,2	39,7	54,6

При желобном способе жидкий шлак сливают в желоб, по которому под малым напором стекает вода, продукция скапливается в бассейне с водой. В этом случае создаются условия для вспучивания шлака и образования крупных пористых гранул, обладающих низкой прочностью, высокими значениями ВУС (54,6%) и влажности (24,6%).

Общей закономерностью, вытекающей из результатов испытаний различных фракций шлака, трех способов грануляции, являются повышение ВУС с уменьшением размеров и увеличением пористости гранул. Это объясняется тем, что материал с более развитой поверхностью удерживает больше пленочной и капельной воды, что показано на гистограммах (рис. 1 и рис. 2).

Все рассмотренные способы грануляции являются мокрыми. Содержание влаги в граншлаке достигает 24,5% (рис. 1, а). Для дальнейшего использования шлака требуется проводить его обезвоживание.

В.А. Успенским и М.А. Шарановым установлено, что в условиях естественной фильтрации влажность шлака снижается сначала быстро, затем замедляется, асимптотически приближаясь к некоторой постоянной величине, характеризующей ВУС шлака при неограниченном времени обезвоживания (рис. 3).

Известен также способ подсушивать горячий шлак после естественной фильтрации путем продувки воздуха (В.А. Успенский, М.А. Шаронов) и использования физического тепла шлака. Расход воздуха при этом значителен.

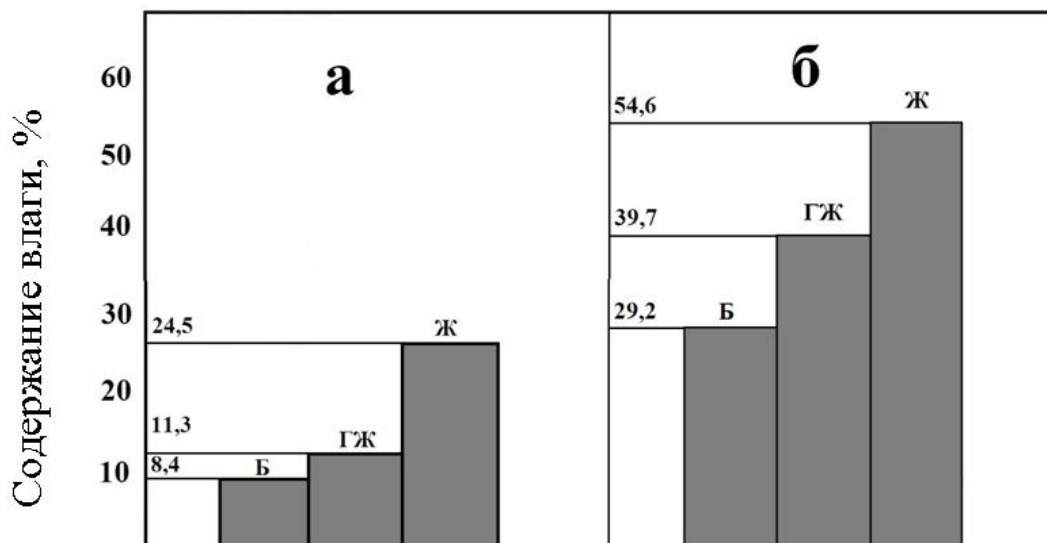


Рис. 1 – Гистограммы значений влажности (а) и ВУС (б) при разных способах грануляции: Б – барабанный, ГЖ – гидрожелобной, Ж – желобной

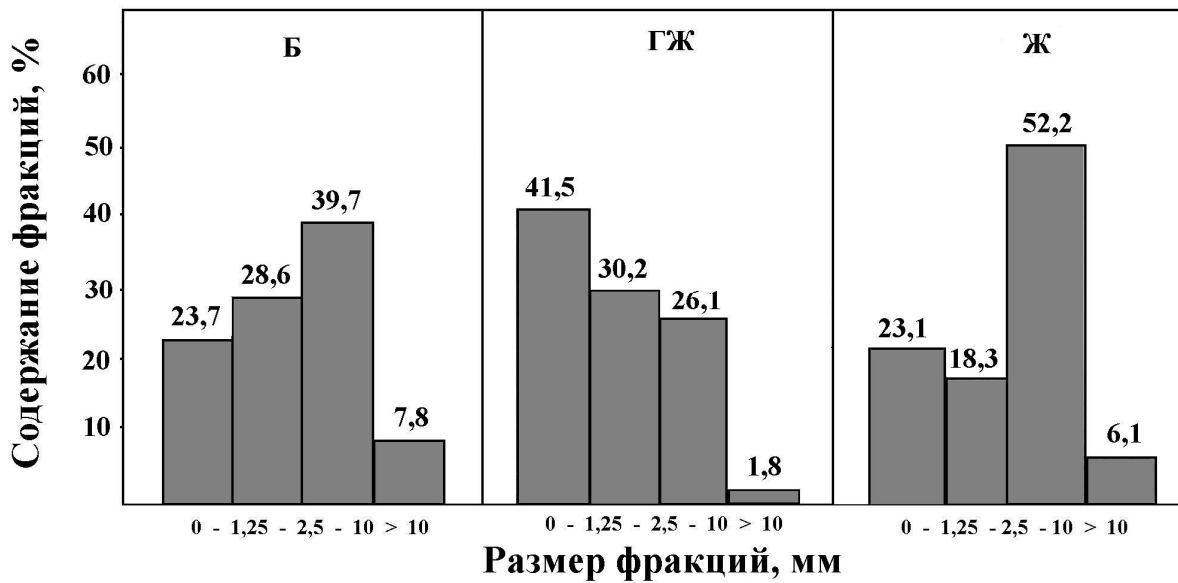


Рис. 2 – Гистограммы величин содержания фракций при разных способах грануляции: Б – барабанный, ГЖ – гидрожелобной, Ж – желобной

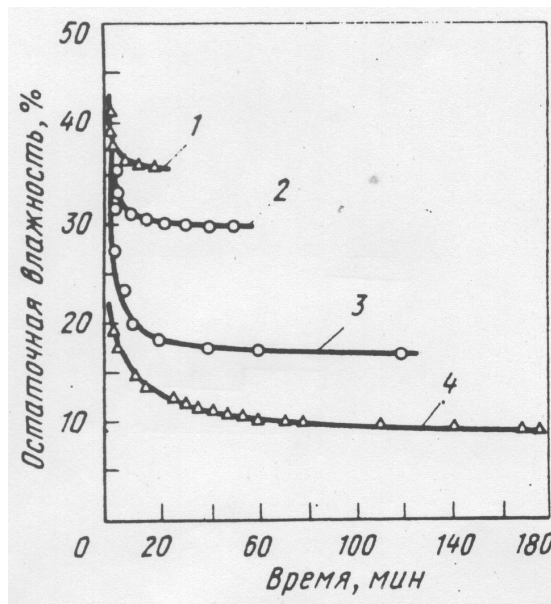


Рис. 3 – Зависимость остаточной влажности гранулированного шлака от высоты его слоя: 1 – 175 мм; 2 – 370 мм; 3 – 670 мм; 4 – 2500-3000 мм [4]

Устройство для просушки шлака для его физического тепла на припечной установке комбината «Криворожсталь» не используется. Известен также способ интенсификации обезвоживания шлака путем его продувки сверху вниз. Расход воздуха при этом приблизительно равен объему вытесняемой воды. На рис. 4 приведены гистограммы значения величин остаточной влажности шлака (насыпная масса 1050 кг/м<sup>3</sup>) припечной грануляции при разных способах грануляции, из которых следует, что наименьшую влажность шлак содержит после продувки потоком газа, направленным сверху вниз.

Таким образом, реальными направлениями снижения влажности гранулированного шлака могут быть: разработка технологий грануляции, обеспечивающей получение продукции повышенной плотности с малым содержанием мелких фракций; обезвоживание шлака в высоких бункерах и штабелях при достаточном времени выдержки (рис. 3); продувка слоя шлака потоком газа, направленным сверху вниз (рис. 4).

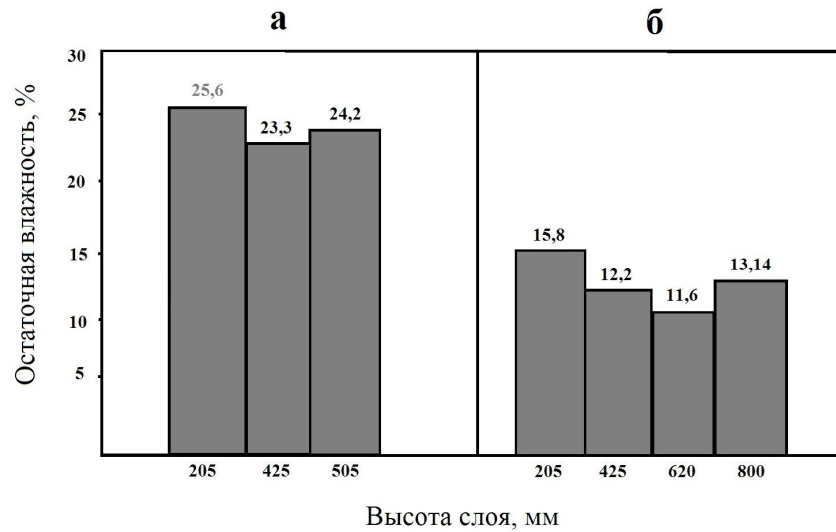


Рис. 4 – Гистограммы значений остаточной влажности гранулированного шлака при способах обезвоживания: а – после фильтрации, б – после продувки

Эффективным путём сокращения расхода воды на грануляцию шлака и получение продукции с низкой влажностью является применение диспергирования расплава механических грануляторов и газообразного энергоносителя (например, воздуха) [7].

На припечной грануляционной установке доменной печи объемом 5000 м<sup>3</sup> комбината «Криворожсталь» проведены промышленные опыты по грануляции шлака водовоздушной струей. Сравнительный анализ обычного и опытного гранулированного шлака показал, что применение воздушного дутья для диспергирования расплава в основном влияет на фракционный состав и форму полученных зерен. Существенно снижается количество мелких фракций: содержание фракций < 1,25 мм уменьшилось до 49,1 против 92,8% в обычном, а насыпная масса возросла до 1265-1332 против 1175 кг/м<sup>3</sup> [8]. При этом в гранулированном шлаке, полученном с применением дутья, содержится до 33% зерен сферической формы с плотной поверхностью. В обычном гранулированном шлаке такие частицы отсутствуют. Их наличие снижает вододерживающую способность шлака с 46 до 41%. Укрупнение частиц также замедляет процессы цементации в системе оборотного водоснабжения грануляционной установки. На рис. 5 представлены гистограммы, отображающие содержание фракций в гранулированном шлаке, полученном вододутьевым способом (А) и обычным (В).

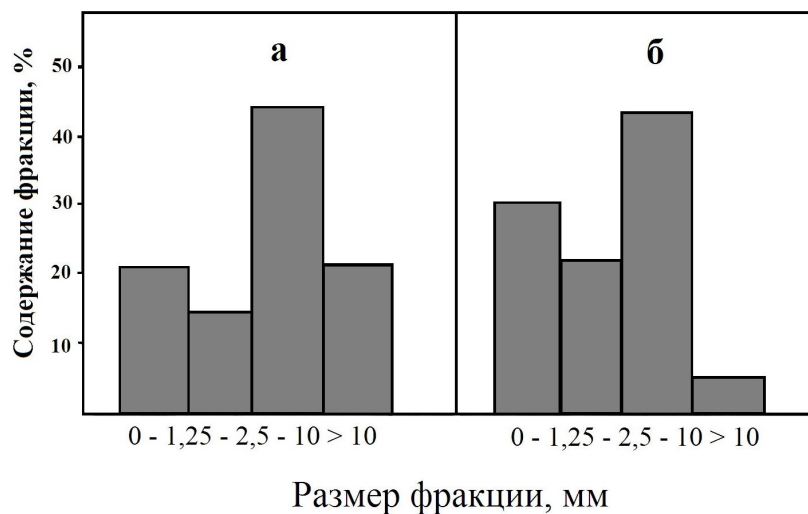


Рис. 5 – Содержание фракций в граншлаках, полученных: а – вододутьевым способ, б – обычный

При вододутьевом способе содержание мелких фракций в граншлаке меньше, чем при обычном. Водоудерживающая способность такого шлака в 1,5 раза ниже, чем обычного, гидравлическая активность его не снижается, размалываемость даже несколько повышается.

Применение вододутьевого способа позволяет снизить расход подаваемой на грануляцию воды до 0,7-1,5 м<sup>3</sup>/т (рис. 6). При расходе воздушного дутья около 200 м<sup>3</sup> подача воды может быть сокращена до 1 м<sup>3</sup>/т и ниже [3]. Сокращение расхода воды до 0,6 м<sup>3</sup>/т исключает потребность в системе оборотного водоснабжения, а влажность шлака может быть снижена до 5-7%.

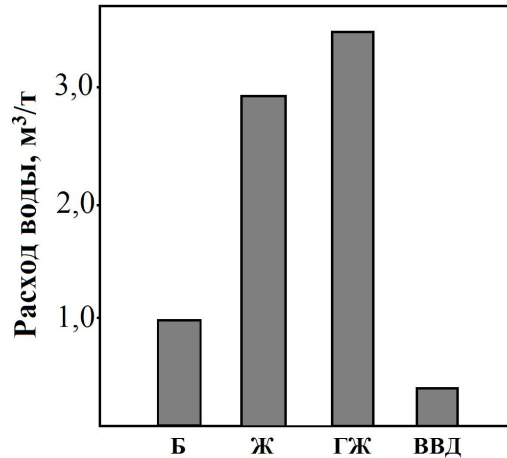


Рис. 6 – Гистограммы зависимости удельного расхода воды при различных способах грануляции: Б – барабанный, Ж – желобной, ГЖ – гидрожелобной, ВВД – водовоздушное дутье (полусухой способ)

### Выводы

1. Выдвинутый автором современный принцип: доменная печь как агрегат для комплексного производства двух основных видов продукции – чугуна и шлака должен сопровождаться внедрением новых технологий получения качественного граншлака и дальнейшей полной его переработки и использования.
2. Грануляция шлаков является операцией, фиксирующей, образующиеся при быстром охлаждении шлакового расплава, определенную структуру в стеклообразном состоянии, закрепляющей активные гидравлические свойства.
3. Общей закономерностью трех мокрых способов грануляции (барабанный, гидрожелобной и желобной) является повышение ВУС с уменьшением размеров и увеличением пористости гранул, что объясняется более развитой поверхностью, удерживающей больше пленочной и капиллярной воды, содержание которой достигает 24,5%. Недостатком мокрых способов грануляции является необходимость проводить дополнительно обезвоживание шлака.
4. Для мокрых способов реальным направлением снижения влажности гранулированного шлака могут быть: разработка технологии грануляции, обеспечивающей получение продукции повышенной плотности с малым содержанием мелких фракций; обезвоживание шлака в высоких бункерах и штабелях при достаточном времени выдержки; продувка слоя шлака потоком газа, направленным сверху вниз.
5. Эффективным путем сокращения расхода воды на грануляцию и получение продукции с низкой влажностью является применение для диспергирования расплава механических грануляторов и газообразного энергоносителя (воздуха) – полусухой или сухой способы грануляции. При этом удается снизить расход подаваемой на грануляцию воды с 3,0 до 0,7-1,5 м<sup>3</sup>/т. Применение воздушного дутья для диспергирования расплава влияет на фракционный состав и форму зерен граншлака и является эффективным для получения качественного граншлака.
6. Исходя из отмеченных недостатков по физико-механическим характеристикам граншлака, получаемого по современным способам грануляции шлакового расплава, можно сделать вывод о необходимости разработки новой технологии сухой грануляции путем воздушного

дутья. Для решения этой задачи необходимо рассмотреть теоретические вопросы распада шлаковой струи под воздействием воздушного потока, скорость охлаждения частиц расплава в воздушном потоке и вопросы изменения вязкости расплавленного шлака в зависимости от температуры. Решение этих вопросов может послужить основой для разработки технологии сухой грануляции шлакового расплава с целью получения качественного граншлака, отвечающего требованиям потребителя.

#### Список использованных источников:

1. Кравченко В.П. Гидравлическая активность доменных шлаков / В.П. Кравченко, В.А. Струтинский // Сталь. – 2007. – №1. – С. 94-95.
2. Кравченко В.П. Обґрунтування параметрів струминного подрібнення при переробці і збагаченні доменних шлаків : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.15.08 / В.П. Кравченко; ДВНЗ «Національний гірничий університет». – Дніпропетровськ, 2013. – 20 с.
3. Переработка шлаков и безотходная технология в металлургии / М.И. Панфилов, Я.Ш. Школьник, Н.В. Орининский, Ю.В. Сорокин, А.А. Грабеклс. – М.: Металлургия, 1987. – 237 с.
4. Ягодкин Г.Л. Химическая технология и охрана окружающей среды / Г.Л. Ягодкин, Л.Г. Третьяков. – М.: Знание, 1984. – 63 с.
5. Довгопол В.И. Использование шлаков черной металлургии / В.И. Довгопол. – М.: Металлургия, 1978. – 106 с.
6. Панфилов М.И. Металлургический завод без шлаковых отвалов / М.И. Панфилов. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
7. Влияние технологических параметров процесса придоменной грануляции на свойства гранулированного шлака / В.А. Коломиец, Л.Б. Никулина, Н.Г. Овчаренко, В.Г. Костров, А.С. Семенова // Переработка и использование доменных, сталеплавильных и ферросплавных шлаков / В.И. Довгопол, М.И. Панфилов. – Екатеринбург : Уралничермет, 1981. – С. 27-32.
8. Коломиец В.А. О влиянии технологических условий грануляции доменного шлака на его свойства / В.А. Коломиец, В.А. Щербинин, М.Н. Курбацкий // В кн.: Сборник научных трудов. – Магнитогорск: МГМИ, 1986. – Вып. 8. – 142 с.

#### Bibliography:

1. Kravchenko V.P. Hydraulic activity of furnace slag / V.P. Kravchenko, V.A. Strutinski // Steel. – 2007. – №1. – P. 94-95. (Rus.)
2. Kravchenko V.P. Ground of parameters processing and enrichment for jet grinding of blast furnace slag : phd. thesis : 05.15.08 / V.P. Kravchenko; «National mining university». – Dnepropetrovsk, 2013. – 20 p. (Ukr.)
3. Recycling of slags and waste-free process in iron and steel industry / M.I. Panfilov A.S. Skolnik, N.V. Orininsky, Y.V. Sorokin, A.A. Grabekls. – M.: Metallurgy, 1987. – 240 p. (Rus.)
4. Yagodkin G.L. Chemical technology and environmental protection / G.L. Yagodkin, L.G. Tretyakov. – M.: Znanie, 1984. – 63 p. (Rus.)
5. Dovgopol V.I. Application of iron and steel slags / V.I. Dovgopol. – M.: Metallurgiya, 1978. – 106 p. (Rus.)
6. Panfilov M.I. Iron and steel works without slag mountains / M.I. Panfilov. – M.: Metallurgiya, 1978. – 248 p. (Rus.)
7. Influence parameters of technology process at blast furnace on the its characteristics of granulation slag / V.A. Kolomiets, L.B. Nikulina, H.G. Ovcharenko, V.G. Kostrov, A.S. Semenova // Recycling and use of blast furnaces, steel and ferroalloy slags / V.I. Dovgopol, M.I. Panfilov. – Yekaterinburg : Uralniichermet, 1981. – P. 27-32. (Rus.)
8. Kolomiets V.A. About technology conditions og granulation furnae slag on the its charocteristics / V.A. Kolomiets, V.A. Scherbinin, M.I. Kurbatsky // In col. Scientifics works. – Magnitogorsk: MGMI, 1986. – Issue 8. – 142 p. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 14.04.2015