

К. Т. Н. А. Ю. Худяков¹, К. Т. Н. С. В. Ващенко¹, К. Т. Н. К. В. Баюл¹,
К. Т. Н. Ю. С. Семенов² (✉)

¹ Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАНУ,
г. Днепр, Украина

² ООО «Научно-техническое предприятие ДЧМ»,
г. Днепр, Украина

УДК 622.788.32:666.76.002.33

БРИКЕТИРОВАНИЕ КАОЛИНОВОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КУСКОВОГО ШАМОТА

Изучена эффективность брикетирования каолинового сырья в валковом прессе в качестве меры по борьбе с пылеобразованием при обжиге глины. Установлено, что использование для брикетирования валкового пресса с зубчато-желобчатой конфигурацией формующих элементов в сравнении с экструдерным вакуумным прессом позволяет получить брикеты более высокого качества, отличающиеся повышенной устойчивостью к разрушению при термообработке. Определена рациональная влажность глины для брикетирования в валковом прессе (21 %). Установлено, что получение брикетов с такой влажностью позволяет минимизировать разрушение брикетов при термообработке и энергетические затраты на подсушку материала перед прессованием, а также увеличить выход целых брикетов из прессы при обеспечении высокой прочности сырых брикетов.

Ключевые слова: каолиновое сырье, брикетирование, шамот, пылеобразование.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из приоритетных направлений совершенствования технологии изготовления кускового шамота является борьба с пылеобразованием при термической обработке каолиновой глины во вращающихся печах, поэтому развитие способов дообжиговой подготовки глинистого сырья относится к актуальным научно-производственным задачам.

На предприятии ПАО «Ватутинский комбинат огнеупоров» подготовка каолина к обжигу для получения шамота включает следующие стадии: грубое измельчение, сепарацию камней, среднее измельчение, усреднение и уплотнение. Последняя операция осуществляется путем пластичного формования мелкофракционной глины с карьерной влажностью в экструзионном вакуумном прессе СМК-217. На выходе из пресса получают брикеты цилиндрической формы, имеющие диаметр около 20 мм и влажность 23–25 %. Для обжига предприятие использует вращающиеся печи длиной 75 и диаметром 3,6 м. Сушка каолиновых брикетов перед подачей во вращающуюся печь не предусмотрена, а роль сушилки выполняет зона подготовки печи, температура в которой составляет

около 400 °С. В дальнейшем каолиновую глину термообработывают в зоне спекания печи при температурах около 1300–1400 °С.

Существенным недостатком описанной технологической схемы является разрушение экструзионных брикетов при термообработке и унос до 20 % глины [1] в виде пыли, представляющей собой неоднородную смесь твердых частиц различной степени дегидратации и обжига. Такой объем пыли приводит к серьезному износу пылеулавливающего оборудования, а последующее использование (смешивание со свежей глиной, уплотнение и возврат в печь) снижает экономичность обжига и ухудшает качество шамота [2].

Эффективной мерой в борьбе с пылеобразованием является повышение качественных характеристик каолиновых брикетов на входе в обжиговую печь, что становится возможным при использовании валкового брикетного пресса.

В отличие от экструзионного прессования, заключающегося в продавливании пастообразной дисперсной системы влажностью не менее 20–25 % через формующий инструмент [3], брикетирование в валковом прессе осуществляется в плавно замыкающихся калибрах, выполненных на рабочих поверхностях валков, а необходимость в поддержании высоких значений влажности отсутствует. При брикетировании материала в валковом прессе происходит постепенное нарастание давления в сближающихся калибрах, замыкающихся по мере вращения валков, вслед-



Ю. С. Семенов
E-mail: yuriy.semenov.isi@gmail.com

ствие чего реализуется максимально возможное сближение частиц, их деформация, разрушение и перераспределение. Возникают благоприятные условия для развития межатомного и межмолекулярного сцепления частиц за счет адгезионных процессов. Такой механизм прессования позволяет получить брикеты с максимально плотной упаковкой зерен и улучшенными прочностными характеристиками [4].

Цель работы — исследование влияния процесса брикетирования каолинового сырья в валковом прессе на качество сырых брикетов и стойкость их к разрушению во время термической обработки. Сформулирована комплексная задача определения рациональной влажности глины с учетом следующих условий: минимизация энергетических затрат на подсушку исходного материала перед прессованием; увеличение выхода целых брикетов после прессования; увеличение прочности сырых брикетов после прессования; минимизация потерь материала за счет разрушения брикетов при термообработке.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты проводили по методикам, разработанным в лаборатории подготовки шихтовых материалов Института черной металлургии НАНУ.

Для исследования использовали каолиновую глину Мурзинского месторождения. Химический состав каолиновой глины, %: Al_2O_3 44,02, SiO_2 50,56, CaO 0,22, MgO 0,41, Fe_2O_3 0,95, TiO_2 1,38, Na_2O 0,05, K_2O 0,16, $\Delta m_{\text{прк}}$ 2,25. Гранулометрический состав каолиновой глины (влажностью 21 %), %: >5 мм 28,63, 5–3 мм 14,85, 3–2 мм 9,92, 2–1 мм 20,09, 1–0,5 мм 26,51; средневзвешенный диаметр частиц 3,34 мм. Влажность глины изменяли дискретно с шагом 5 % в диапазоне от 5 до 25 %. Насыпная плотность материала влажностью 21 % составила 1,084 г/см³.

Брикеты получали в лабораторном валковом прессе с валками диаметром 500 и шириной 100 мм, оснащенном датчиками измерения усилия прессования, при частоте вращения 3 об/мин. Характеристика формирующих элементов: объем 11 см³, размеры 32×30×15 мм, форма зубчато-желобчатая («пельменеобразная»). Управление силовыми параметрами процесса брикетирования осуществляли варьированием размеров очага деформации материала в прессе, для этого изменяли положение шиберной заслонки, ограничивающей поступление шихты в формирующие элементы. Качество сырых брикетов оценивали по их прочности, которую определяли одиночным сбрасыванием брикетов с высоты 1 м на стальную плиту. В каждом опыте выполняли по пять повторов, после чего усредняли количество сбрасываний и фиксировали результат.

Для воспроизведения условий термической обработки брикетов из каолиновой глины при их обжиге во вращающейся печи пробу, состоящую из пяти сырых каолиновых брикетов, помещали на 10 мин в рабочую камеру лабораторной муфельной электропечи, разогретой до 400 °С. После извлечения ее просеивали через сито с ячейкой размером 10 мм и определяли выход фракции мельче и крупнее 10 мм. Затем пробу помещали еще на 10 мин в муфельную печь, разогретую до 1000 °С. После извлечения пробу снова просеивали через сито с размером ячейки 10 мм и определяли выход фракций. В ходе эксперимента использовали брикеты, полученные на валковом прессе при оптимальных технологических режимах брикетирования и исходной влажности глины 5–25 %, а также экструзионные брикеты влажностью 23,7 %, которые используются для обжига на комбинате.

Эксперимент, поставленный по данной методике, моделирует последовательное прохождение каолиновыми брикетами зоны подготовки (сушки) и части зоны спекания во вращающейся печи, а выход фракций мельче и крупнее 10 мм после каждой стадии термообработки отражает степень разрушения брикетов в процессе обжига. При этом по выходу фракции мельче 10 мм можно прогнозировать развитие процесса пылеобразования. Действительно, перемещаясь вдоль печи в постоянно пересыпающемся слое материала, кусочки мельче 10 мм испытывают статические и динамические нагрузки, обусловленные давлением веса вышележащих слоев материала и разрушающим воздействием со стороны агрегатов крупнее 10 мм, имеющих сравнительно большую прочность, вес и кинетическую энергию. Следовательно, можно предположить, что именно фракция мельче 10 мм подвергается измельчению и покидает печь вместе с дымовыми газами в виде пыли.

Во время эксперимента температуру термообработки ограничили 1000 °С, так как при превышении этого значения начинаются процессы спекания и минералообразования, особенности протекания и результаты которых определяют режим обжига и свойствами глины, а не качеством сырых каолиновых брикетов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные данные, полученные в ходе исследования процесса брикетирования каолинового сырья в валковом прессе, показаны на сводных гистограммах рис. 1.

Анализ приведенных зависимостей свидетельствует о неоднозначном влиянии влажности шихты на показатели процесса брикетирования и качество сырых брикетов. С одной стороны, уменьшение содержания влаги в глине повышает сопротивление материала сжатию и,

соответственно, усилие прессования (при наименьшей влажности 5 % усилие прессования было максимальным и составило 363 кН), что должно было привести к росту степени уплотнения материала и прочности брикетов. Однако во всем диапазоне влажностей плотность валковых брикетов менялась незначительно (от 2,15

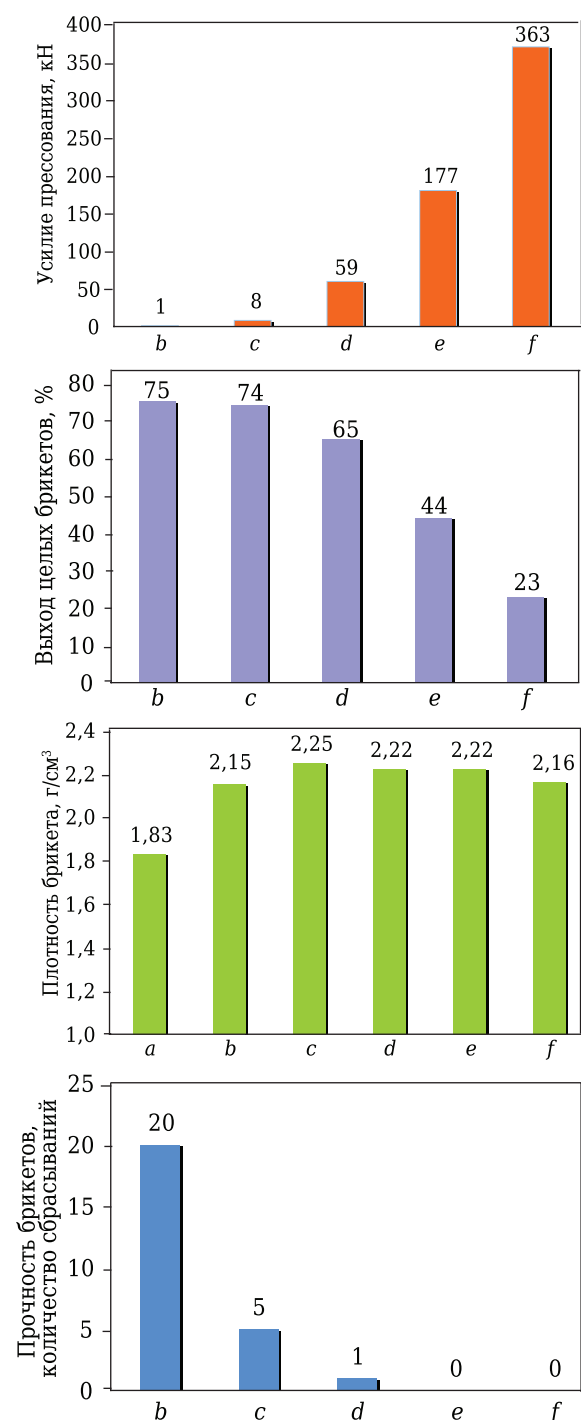


Рис. 1. Технологические показатели брикетирования каолиновой глины: а — экструзионные брикеты влажностью 23,7 %; b, c, d, e, f — валковые брикеты влажностью 25, 21, 15, 10, 5 % соответственно

до 2,22 г/см³), достигая пикового значения 2,25 г/см³ при влажности 21 %, а прочность с уменьшением содержания влаги снизилась. При влажности 10 и 5 % наблюдалась не только минимальная прочность, составившая 0 сбрасываний, но и наименьший выход целых сырых брикетов из валкового пресса, равный 44 и 23 % соответственно. С другой стороны, увеличение содержания влаги в глине до крайнего значения 25 % привело к двум негативным последствиям. Во-первых, шихта чрезмерно пластифицировалась, и поэтому брикеты, выдерживавшие до 20 сбрасываний, полностью деформировались и теряли форму. Во-вторых, в результате усиления адгезионного сцепления между контактными поверхностями брикетов и прессующих калибров валков развивалось залипание брикетируемой массы в ячейках, что снизило технологичность процесса. Можно предположить, что формирование прочностных связей в объеме брикета из увлажненной каолиновой глины осуществляется за счет действия аутогезионного сцепления между частицами твердой фазы при участии жидкой фазы, а содержание влаги и величина усилия прессования определяют преимущественное развитие конкретных сил межатомного и межмолекулярного взаимодействия.

При влажности в диапазоне более 10, но менее 25 % аутогезия материала определяется развитием сил капиллярного сцепления в жидкостных манжетах между частицами и когезией молекул адсорбированных пленок воды на поверхностях высокодисперсных частиц глины. Благодаря высокой прочности индивидуальных контактов при данной комбинации межатомных и межмолекулярных сил [5], а также значительной общей площади контакта частиц (вследствие развития деформационных процессов в зоне прессования валкового пресса) брикеты имеют технологически достаточные значения основных качественных показателей. Брикеты, полученные из глины с содержанием влаги 21 %, характеризуются максимальной плотностью 2,25 г/см³, высоким выходом целых брикетов из пресса 74 % и удовлетворительной прочностью 5 сбрасываний.

Увеличение содержания жидкости до 25 % и выше, вероятно, приводит к так называемому «канатному состоянию» влаги, когда на фоне уменьшения или исчезновения стягивающих капиллярных менисков происходит постепенное падение сил сцепления [6], что становится причиной описанной выше избыточной пластификации глины и объемных деформаций брикетов при испытаниях на прочность.

Уменьшение содержания влаги до 10 % и ниже приводит к тому, что основными силами аутогезии становятся молекулярные (вандерваальсовы) силы между твердофазными частицами, удельная величина которых значительно

меньше, чем у сил коллоидного сцепления и капиллярных сил [5]. Кроме того, поскольку рост усилия прессования, наблюдаемый при таком уменьшении влажности, не приводит к уплотнению материала, то развивается так называемое упругое последствие, которое сопровождается разрывом межчастичных контактов и появлением трещин в брикете [7]. Поэтому брикетирование глины с содержанием влаги 10 и 5 % сопровождается наименьшим выходом целых брикетов, которые имеют минимальную прочность.

В таблице представлены результаты эксперимента по исследованию стойкости брикетов из каолиновой глины к разрушению во время термообработки.

Наибольшему разрушению в процессе сушки при 400 °С подвержены экструзионные брикеты, полученные на вакуумном прессе СМК-217 (рис. 2, а, б), и валковые брикеты влажностью 25 %. Для экструзионных брикетов выход фракции крупнее 10 мм, рассчитанный на сухую массу, составил 44,5 % (55,5 % фракции мельче 10 мм), а для валковых брикетов влажностью 25 % выход фракции крупнее 10 мм достиг 78,20 % (21,8 % фракции мельче 10 мм). Дальнейшее понижение влажности валковых брикетов благоприятным образом отразилось на их качестве. При сушке валковых брикетов с содержанием влаги 21 % выход фракции мельче 10 мм сократился до 6,59 % (рис. 2, в, г), а в диапазоне влажности от 15 до 5 % образование мелкой фракции снизилось до 1,49–0,3 %.

Выдержка брикетов при 1000 °С также приводит к снижению выхода фракции крупнее 10 мм. Необходимо отметить, что величина потерь массы этой фракции как для экструзионных, так и для валковых брикетов во всем исследованном диапазоне влажностей находится в пределах 8,87–11,18 %.

Из данных работы [8] следует, что при сушке глинистых материалов наблюдаются три периода, характерные для сушки всего класса капиллярно-пористых коллоидных тел: период возрастающей, постоянной и падающей скорости сушки [9]. С точки зрения возможности разрушения брикетов, наибольшую опасность представляют последние два периода.

Для периода постоянной скорости сушки характерна усадка образца, достигающая у глинистых материалов значительного развития. Усадка всегда происходит неравномерно, что обуславливается прежде всего разной влажностью в поверхностной и центральной зоне брикета, так как фронт сушки в течение всего периода остается на поверхности образца. Следствием неравномерной усадки является появление местных внутренних напряжений, приводящее к трещинообразованию и снижению механической прочности брикетов.

Особенностью периода падающей скорости сушки является внутриобъемное испарение и миграция пара в брикете. Испарение влаги происходит с поверхности границы раздела зон влажного и высушенного материала, которая в данном периоде всегда находится в объеме

Термическая стойкость брикетов из каолинового сырья

Влажность каолиновой глины	Выход фракции, мас. %, при термообработке*			Тип прессового оборудования
	при 400 °С		при 1000 °С	
	>10 мм	<10 мм	>10 мм	
23,7	44,5	55,5	33,95	Экструзионный вакуумный пресс СМК-217 Лабораторный валковый пресс ИЧМ
25,0	78,20	21,80	69,07	
21,0	93,41	6,59	82,23	
15,0	98,94	1,06	89,65	
10,0	99,22	0,78	89,56	
5,0	99,70	0,30	89,49	

* Выдержка 10 мин.

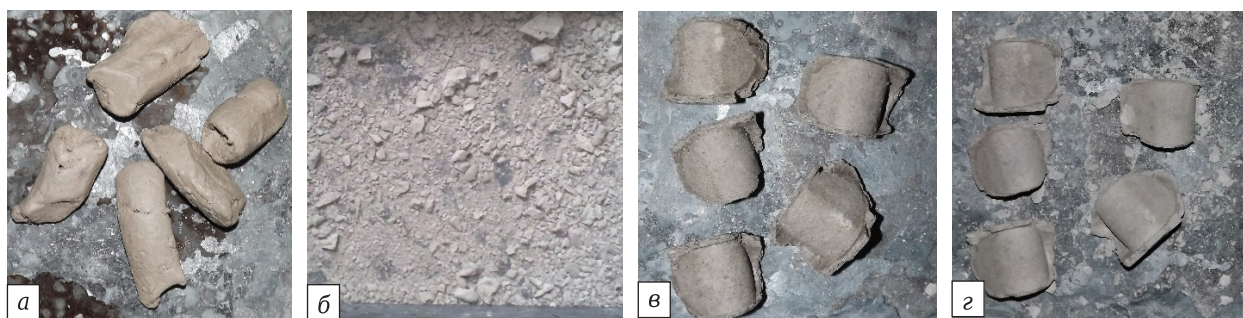


Рис. 2. Экструзионные (а, б) и валковые (в, г) брикеты до (а, в) и после термообработки при 400 °С в течение 10 мин (б, г)

брикета и перемещается вглубь него. Благодаря возникающему давлению парогазовой смеси при внутриобъемном испарении, именно в периоде падающей скорости часто наблюдается так называемое «шоковое разрушение» [6]. Данное явление происходит в том случае, если пары воды образуются настолько интенсивно, что не успевают полностью выйти из брикета наружу через систему пор высушенного объема, и при превышении давлением паров определенного критического значения, брикет разрушается. Решающее влияние на степень разрушения каолиновых брикетов при сушке при 400 °C оказали два фактора: содержание влаги и механизм брикетирования глины.

Уменьшение содержания влаги в брикетах снижает величину давления парогазовой смеси при внутриобъемном испарении из глубины брикета в период падающей скорости сушки. Поэтому начиная с определенного содержания влаги указанное давление становится меньше критического, необходимого для «шокового разрушения» брикетов. Согласно экспериментальным данным, такому содержанию влаги для валковых брикетов соответствует 21 % влажности, так как во время сушки при этой влажности образуется только 6,59 % фракции мельче 10 мм. Дальнейшее снижение содержания влаги приводит к уменьшению разрушения брикетов и снижению выхода мелочи фракции мельче 10 мм практически до нулевой отметки (0,3 % фракции мельче 10 мм для сушки брикетов влажностью 5 %).

Однако снижение содержания влаги в каолиновой глине перед брикетированием ниже 21 % экономически неоправданно. Если принять, что карьерная глина имеет в среднем 23 % воды, то для подсушки 1 т такой глины до влажности 21 % нужно затратить 45,2 МДж энергии, а до 5 % — уже 407 МДж энергии. Поскольку в большинстве технологических процессов металлургической промышленности уменьшение производительности на 10–20 % за счет образования некондиционного продукта (возврата) считается нормальной практикой, то и выход 6,59 % мелочи при сушке следует признать вполне допустимым.

При брикетировании каолиновой глины в экструдерном и валковом прессах реализуются два принципиально различных механизма прессования, что приводит к серьезной разнице плотности получаемых брикетов. Плотность отобранных на комбинате экструдерных брикетов составляет 1,8 г/см³ (см. рис. 1), а валковых брикетов находится в диапазоне от 2,15 до 2,25 г/см³, что в среднем на 23 % выше. Отметим также, что плотность показывает степень сближения частиц, поэтому в более плотных брикетах силы сцепления получают большее развитие. В свою очередь, увеличение плотности структу-

ры валковых брикетов уменьшает развитие неравномерной усадки во время периода постоянной скорости сушки, следовательно, снижается вероятность образования трещин и увеличивается прочность брикетов в ходе сушки. Степень проявления «шокового разрушения» брикетов в третьем периоде сушки напрямую зависит от того, в каком состоянии находится брикет к окончанию второго периода сушки. Таким образом, брикеты, в меньшей мере испытывавшие неравномерную усадку во втором периоде сушки, будут более устойчивы к разрушению в третьем периоде сушки. Считается, что слабо уплотненные, пористые материалы обладают более высокой влагонепроводностью, чем сильно уплотненные, и должны лучше отводить парогазовую смесь во время сушки и меньше разрушаться, но в случае сушки экструдерных брикетов положительное влияние этого фактора нивелируется отрицательным воздействием неравномерной усадки.

Сделанные выводы подтверждаются экспериментальными данными. Несмотря на то, что влажность экструдерных брикетов составляет 23,7 %, а валковых брикетов 25 %, степень разрушения первых (55,5 % фракции мельче 10 мм) более чем в 2 раза превышает степень разрушения вторых (21,8 % фракции мельче 10 мм). Следовательно, улучшение качества брикетов за счет изменения механизма прессования оказывается даже более важным, чем количество влаги.

Рассматривая результаты выдержки брикетов при 1000 °C, отметим, что визуально разрушения не наблюдалось, но была зафиксирована потеря массы фракции крупнее 10 мм, величина которой оказалась приблизительно равной для всех исследованных брикетов (8,87–11,18 %). Проведенные аналитические расчеты дают вывод, что данное уменьшение массы обусловлено удалением химически связанной воды каолинита $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Рассмотрев химический состав каолиновой глины и предположив, что Al_2O_3 и SiO_2 полностью входят в состав каолинита, рассчитали массовую долю химической влаги каолинита и ее содержание в глине. Определили, что с погрешностью до 1,5–2,0 %, указанному содержанию Al_2O_3 и SiO_2 в каолиновой глине соответствует 15,5 % влаги. Учитывая, что каолинит не является единственным алюмосиликатом каолиновой глины и что в ней всегда содержатся другие минералы, можно считать данный расчет корректным, а предположение верным. Удаление химически связанной влаги через прочную и пористую массу метакаолинита не может вызвать внутренних напряжений, способных разрушить брикет. Следовательно, выдержку при 1000 °C можно считать условно безопасной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что наиболее разрушительной стадией термообработки является сушка при температурах около 400 °С. Для снижения вредного влияния сушки можно уменьшить начальное содержание влаги в брикетах, реализовать «мягкие» режимы сушки (с низкими скоростями влагоудаления), использовать валковые прессы с зубчато-желобчатой конфигурацией формирующих элементов для брикетирования каолиновой глины перед загрузкой в печь. Для снижения энергозатрат на сушку глины и минимизации изменений в существующей технологической линии предприятия следует признать первые два из вышеуказанных мероприятий нерациональными и рекомендовать третье — брикетирование каолиновой глины в валковых прессах.

Библиографический список

1. **Зеленюк, Т. В.** Исследование влияния вакуумирования каолиновых масс на физико-механические свойства шамота кускового / Т. В. Зеленюк, А. С. Юдин, Ж. Вандерстен, О. Б. Стародумова // Вестник ХПИ: химия, химическая технология и экология : сб. науч. тр. — 2008. — Вып. 39. — С. 8–13.
2. **Стрелов, К. К.** Технология огнеупоров / К. К. Стрелов, И. Д. Кашеев, П. С. Мамыкин. — М. : Металлургия, 1988. — 528 с.
3. **Ожогин, В. В.** Основы теории и технологии брикетирования измельченного металлургического сырья / В. В. Ожогин. — Мариуполь : ПГТУ, 2010. — 442 с.
4. **Маймур, Б. Н.** Брикетирование металлургического сырья. Актуальность и пути развития метода / Б. Н. Маймур, А. Ю. Худяков, В. И. Петренко [и др.] // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». — 2016. — № 1. — С. 74–82.
5. **Зимон, А. Д.** Аутогезия сыпучих материалов / А. Д. Зимон, Е. И. Андрианов. — М. : Металлургия, 1978. — 288 с.
6. **Ковалёв, Д. А.** Теоретические основы производства окучкованного сырья / Д. А. Ковалёв, Н. Д. Ванюкова, В. П. Иващенко [и др.]. — Днепропетровск : ИМА-пресс, 2011. — 476 с.
7. **Маймур, Б. Н.** Исследование влияния свойств мелкофракционных шихтовых материалов на их уплотнение в валковых брикетных прессах / Б. Н. Маймур, И. Г. Муравьева, В. И. Петренко, С. В. Ващенко // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : сб. науч. тр. ИЧМ НАН Украины. — Вып. 28. — Киев : Наукова думка, 2014. — С. 310–325.
8. **Худяков, А. Ю.** Влияние содержания бентонита в составе железорудных окатышей на кинетику их сушки / А. Ю. Худяков, Д. А. Ковалев, М. В. Ягольник // Системные технологии : регион. межвуз. сб. науч. тр. — 2009. — № 4 (63). — С. 150–157.
9. **Лыков, А. В.** Теория сушки / А. В. Лыков. — М. : Энергия, 1968. — 472 с. ■

Получено 10.05.18

© А. Ю. Худяков, С. В. Ващенко,
К. В. Баюл, Ю. С. Семенов, 2018 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

IRANANO
2018
11-я Международная выставка
по нанотехнологиям
13–16 октября 2018 г.
г. Тегеран, Иран