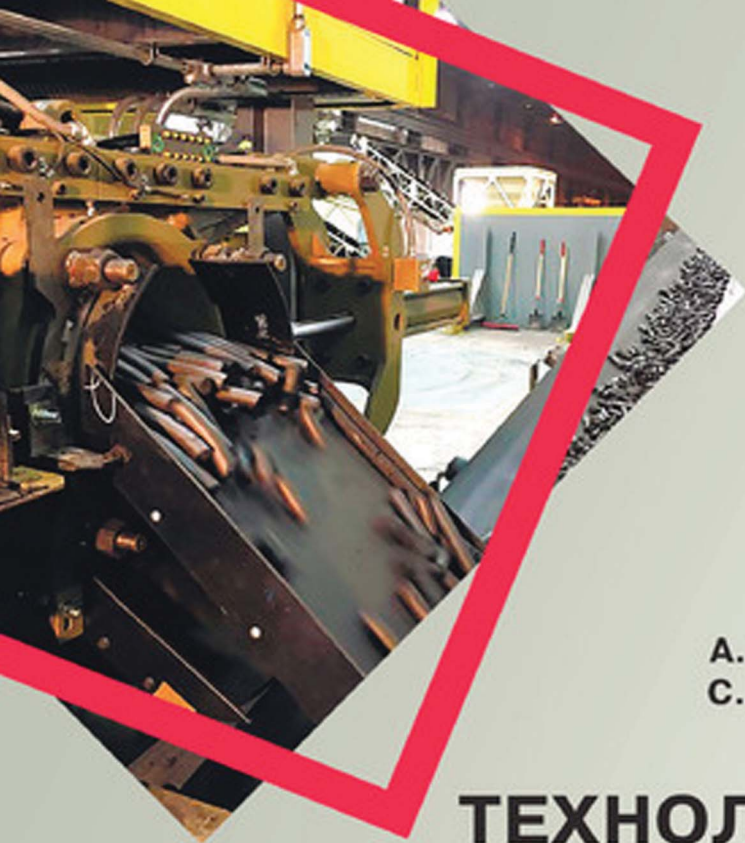




А. М. Бижанов
С. А. Загайнов

ТЕХНОЛОГИИ БРИКЕТИРОВАНИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ



«Инфра-Инженерия»

УДК 669.1
ББК 34.32
Б59

Бижанов, А. М.

Б59 Технологии брикетирования в черной металлургии : монография /
А. М. Бижанов, С. А. Загайнов. – Москва ; Вологда : Инфра-
Инженерия, 2020. – 256 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-0436-5

Рассмотрены основные промышленные брикетные технологии черной металлургии, дана характеристика необходимого оборудования, раскрыты достоинства и недостатки каждой технологии. Исследованы металлургические свойства брикетов экструзии (брэксков), предложен анализ опыта экспериментальных и промышленных плавок с брэксами в шихте.

Для инженеров-металлургов, научных работников, преподавателей высших учебных заведений металлургического или политехнического профиля, аспирантов и студентов, обучающихся по специальности «Металлургия».

УДК 669.1
ББК 34.32

ISBN 978-5-9729-0436-5

© А. М. Бижанов, С. А. Загайнов, 2020

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2020

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. ИСТОРИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО БРИКЕТИРОВАНИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ.....	11
ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ БРИКЕТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ	57
2.1. Брикетиrowание с использованием валковых прессов	60
2.1.1. Физические процессы и конструкции прессов валкового брикетиrowания	60
2.1.2. Методы моделирования процессов валкового брикетиrowания	67
2.1.3. Основные производители валковых прессов для брикетиrowания в черной металлургии.....	73
2.2. Брикетиrowание методом вибропрессования	82
2.2.1. Физическая сущность вибропрессования и структура брикета.....	82
2.2.2. Оборудование для вибропрессования, транспортировки, термообработки и хранения брикетов.....	88
2.2.3. Основные производители вибропрессов для брикетиrowания в черной металлургии.....	92
2.3. Брикетиrowание методом жесткой вакуумной экструзии (ЖВЭ)	95
2.3.1. Технологический процесс окускования методом жесткой вакуумной экструзии.....	99
2.3.2. Основное оборудование для брикетиrowания методом жесткой вакуумной экструзии	113
ГЛАВА 3. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БРИКЕТОВ	117
3.1. Материалы – компоненты шихтовой смеси для брикетиrowания ...	117
3.2. Методики испытания брикетов.....	124
3.3. Механическая прочность брикетов	136
3.4. Брикетиrowание природных и техногенных материалов в доменном производстве	161

3.4.1. Металлургические свойства вибропрессованных доменных брикетов	163
3.4.2. Исследование металлургических свойств и оптимизация составов брикетов экструзии (брэкс) для доменного производства	167
3.4.3. Исследование металлургических свойств промышленных брэкс, применяемых в качестве основного компонента шихты доменной печи	175
3.4.4. Опыт освоения технологии проплавки брикетов при увеличении их доли в шихте до 100 %	185
3.4.5. Оценка перспектив использования углеродсодержащих брикетов из железорудного концентрата.....	187
3.5. Брикетирование природного и техногенного сырья для производства ферросплавов	189
3.5.1. Брикеты на основе первично-окисленного марганцеворудного концентрата	191
3.5.2. Брикеты на основе окисного марганцеворудного концентрата с добавлением пыли аспирации производства силикомарганца	193
3.5.3. Опытнo-промышленная кампания по выплавке силикомарганца с брэксами в шихте руднотермической печи	203
3.5.4. Брикеты для выплавки феррохрома	210
3.5.5. Брикеты на основе отсеков дробления ферросплавов	219
3.6. Брикетирование в процессах производства железа прямого получения	223
3.6.1. Брэксы в шихте реактора прямого получения железа (процесс Midrex)	223
3.6.2. Высокотемпературное восстановление рудоугольных брэкс.....	234
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	242

ГЛАВА 1. ИСТОРИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО БРИКЕТИРОВАНИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Знакомство с брикетированием можно было бы начать с обращения к самому обширному современному информационному ресурсу – к Википедии. Но пытливого читателя постигнет разочарование. В английской версии применению брикета в металлургии вовсе не уделено внимания, а в русской о брикетировании в черной металлургии всего 15 строк. На сайте Cambridge Dictionary (<https://dictionary.cambridge.org>) слово *briquette* переведено как – небольшой блок из угольной пыли или торфа, используется в качестве топлива. Никакого упоминания о металлургических приложениях брикетирования. Здесь слышны отголоски второй мировой войны, когда в Англии для отопления жилищ использовали брикеты из смеси угольной пыли и цемента, формованные в блоки размерами 15 × 15 × 5 см.

Что ж, попробуем восполнить этот пробел. Итак, что же такое брикет. Слово *briquette* (от французского «*brique*» – кирпич) означает прессованное изделие. И в самом деле, как мы увидим далее, история брикетирования тесно переплетена с производством кирпича и некоторых других строительных материалов. И даже первый коммерчески успешный проект брикетирования железорудной мелочи для доменных печей был основан на оборудовании, применявшемся в то время для производства кирпича.

Совершим небольшой экскурс в историю кирпичного дела. Известно, что кирпичное дело зародилось в древнем Египте. В период так называемого Среднего Царства (XXI в. – начало XIX в. до н. э.), когда экономические условия уже не позволяли сооружать гигантские пирамиды, строительным материалом для их строительства становится кирпич-сырец. Так, в основном из такого кирпича и была построена пирамида Сенусерта (длина основания 107 метров, а высота 61 метр). Кирпич, но уже обожжённый, применялся и для облицовки знаменитой Вавилонской башни (зиккурат Этеменанки – «Дом основания небес и земли», II тысячелетие до н. э.). Об этом сказано даже в самой Библии (Бытие, гл. 11–3): *«И сказали друг другу: наделаем кирпичей и обожжём огнём. И стали у них кирпичи вместо камней, а земляная смола вместо извести. И сказали они: построим себе город и башню, высотой до небес, и сделаем себе имя, прежде, нежели рассеемся по лицу всей земли»*. Археологические раскопки на полуострове Индостан позволили доказать, что еще в III тысячелетии до н.э. жилища сооружались из сырцового кирпича. Наиболее известным памятником древности, при сооружении которого использовали сырые и обожжённые кирпичи является Цитадель Мохенджо Даро. Часть Великой Китайской стены, сохранившаяся до наших дней (3-й век до н. э.) была также построена из обожжённого кирпича.

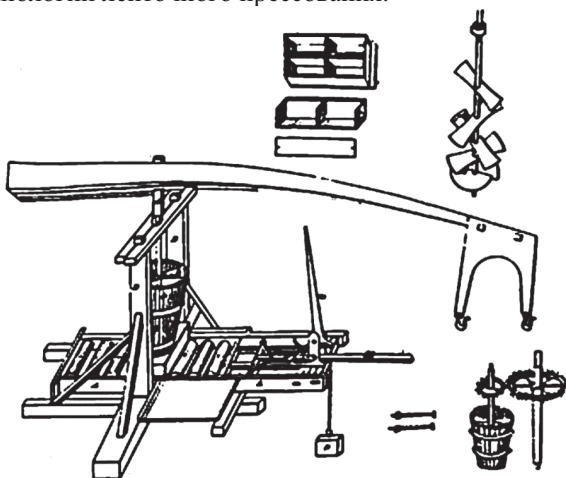
В Древней Руси кирпич появился только в X веке. Первой русской постройкой из этого материала была Десятинная церковь в Киеве. Ярким примером использования кирпичного строительства на Руси времён Иоанна III стало возведение, начиная с 1485 года, стены и храма Московского Кремля,

которым заведовали итальянские мастера: «...и кирпичную печь устроили за Андрониковым монастырём, в Калитникове, в чем ожигать кирпич и как делать, нашего Русского кирпича уже да продолговатее и твёрже, когда его нужно ломать, то водой размачивают. Известь же густо мотыками повелели мешать, как на утро засохнет, то и ножом невозможно расколотить». Основной элемент, из которого возводились стены и башни Московского Кремля, – так называемый двуручный кирпич размерами до $31 \times 15 \times 9$ см и весом до 8 кг.

В Средние века в Западной Европе рост городов и опасность пожаров были одной из причин ограничения использования дерева в строительстве. После Большого пожара 1666 г. английский парламент утвердил знаменитый «Лондонский закон о строительстве», согласно которому запрещалось строить деревянные дома и дома на основе деревянного каркаса [12]. Кирпич знакомой всем современной формы появился в XVI веке в Англии. Наиболее известными средневековыми кирпичными зданиями в Англии являются Хэмптон Корт близ Лондона (начало строительства в 1514 г.), несколько зданий колледжей в Кембридже и замок Херстмонсо в Сассексе (середина XV в.). С XII в. кирпич распространился в Голландии, Дании, Северной Германии и других частях Северной Европы, где ощущался дефицит природного камня. Примерами кирпичных сооружений могут служить: церковь Марии (Мариенкирхе) в г. Любеке (Германия), базилика Сан Амбролио в Милане (Италия) и др. Кирпич был также популярен в мавританской Испании.

До XIX века кирпичи производили вручную, процесс оставался примитивным и трудоёмким. Искусные рабочие-формовщики заполняли сырой глиной мульды (специальные формы), которые затем сушились и, далее, обжигались в напольных печах. Сушили кирпичи исключительно летом, а обжигали в печах, выложенных из высушенного кирпича-сырца. Один из первых патентов на формовочную машину был выдан в 1741 году Уильяму Бейли из Тонтон (Англия, патент Великобритании № 575, 1741). Как и другие ранние машины, это был формовочный аппарат, в значительной степени имитировавший процедуру ручного формования, но со значительно более высокой производительностью. Изобретение Бейли включало в себя отдельную мельницу для придания глине однородности перед формованием; латунные или железные формы, содержащие пять или шесть кирпичей, которые были заполнены гомогенизированной глиной, формованной в кирпич штемпельным или плунжерным прессом; возвратное устройство для циклического повторения процесса. Полвека спустя (7 марта 1792 года) патент на формовочную машину был выдан Дэвиду Риджуэю (David Ridgeway) из Филадельфии (США). Годом позже с интервалом в 5 дней патенты на аналогичные изобретения получили Кристофер Коулс (Christopher Colles) и Аполло Кинсли из Нью-Йорка [13]. В исторических источниках сохранилось лишь описание устройства и принципа работы машины, представленной Аполло Кинсли. В 1800 году на эту конструкцию был выдан и британский патент № 2368 Исааку Сэнфорду (Isaac Sanford), кстати, бывшему земляку Аполло, переселившемуся

в Ковент-Гарден. На рис. 1.1 представлено изображение схемы машины, изобретённой Аполло Кинсли, из британского патента. Что же представляла собой машина? В письме Томасу Джефферсону, бывшему в то время Государственным секретарём США, сам Кинсли описал ее конструкцию следующим образом: «...машина с вращающимся горизонтальным столом, на котором размещены несущие формы, которые последовательно заполнялись глиной, падающей под собственным весом на железную пластину в зарядном устройстве, подвешенном над столом» [14]. Конструкция состояла из непрерывнодвигающегося вверх-вниз мундштука и стола, на который одна за другой помещались формы (всего 8) для их механического наполнения глиной. Замешанная же глина подавалась под большим давлением. Такая машина, успешно функционировавшая в Вашингтоне в 1819 г., имела производительность до 30 000 штук кирпича в сутки, при этом, прочность свежесформованных кирпичей позволяла обойтись без их сушки и отправлять их непосредственно в печи обжига. Интересно отметить, что, несмотря на старания Исаака Сэнфорда, подобные машины не пользовались успехом в Англии. Тем не менее, многие исследователи считают изобретение Кинсли прародителем современной технологии ленточного прессования.



**Рис. 1.1. Машина Аполло Кинсли для производства кирпича
(из патента № 2368, 1800 год)**

Развитием концепции ленточного пресса стала формовочная машина, изобретённая Джоанном Джорджем Дегерлейном в 1810 году в Англии (рис. 1.2) и позволявшая производить кирпичи из полутвёрдой глиняной массы.

Поступающая в машину влажная глиняная масса продавливалась через специальную пресс-форму в виде бруска, который затем разрезался на отдельные кирпичи. Эти первые изобретения послужили основой для широкого распространения ленточного прессования, которому предстоит сыграть важную роль в брикетировании.

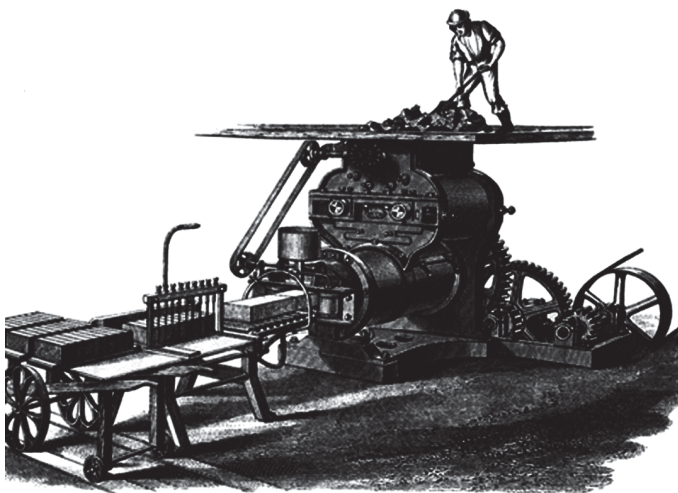


Рис. 1.2. Формовочная машина Дегерлейна (Англия, 1810 год)

Впервые идея использовать пресс для производства брикетов была высказана российским изобретателем А. П. Вешняковым в приложении к брикетированию древесного и каменного угля [15]. С приоритетом от 7 июля 1841 года ему была выдана «привилегия» на новый тип топлива, получивший название «карболеин». Им было предложено подвергать древесный уголь (каменный уголь, кокс) измельчению и просеиванию, после чего добавлять в него растительное или животное масло, полученную массу загружать в мешки (из лыка или крепкой парусины), накрепко обёрнутые верёвками или прочным холстом и сжимать их в гидравлическом прессе. Полученные куски предлагалось далее подвергать сушке. Позже Вешняков предложил заменить мешки чугунными ящиками с отверстиями. Годом позже, в 1842 году, француз Marsais изобретает угольно-топливный брикет с угольной смолой в качестве связующего [16]. В 1843 году аналогичный патент был выдан Wylam в Великобритании [17]. Первый патент на брикетирование угля в США был выдан в 1848 году William Easby (рис. 1.3).

В 1859 во Франции компанией SAHUT-CONREUR в Raismes была построена первая угольная брикетная фабрика, на которой в 1860 году для получения угольных брикетов стали использовать валковый пресс. Сущность концепции такого брикетирования состояла в формовании с помощью двух чугунных валков, поверхность которых была покрыта затопленными эллипсоидальными ячейками, которые при одновременном вращении валков должны были идеально совпадать друг с другом, образуя емкость для формования зажатой в ней брикетируемой массы. Один из первых патентов на конструкцию валкового пресса был получен только в 1884 году J. M. Wilcox в США (рис. 1.4, [18]). Изобретателю удалось существенно упростить конструкцию

валкового пресса за счет использования разделителей, канавок и подъёмников, что удешевило производство таких прессов и способствовало росту масштабов их применения для производства брикетов.

UNITED STATES PATENT OFFICE

WILLIAM EASBY, OF WASHINGTON, DISTRICT OF COLUMBIA.

METHOD OF CONVERTING FINE COAL INTO SOLID LUMPS.

Specification forming part of Letters Patent No. 5,789, dated August 29, 1848.

To all whom it may concern:

Be it known that I, WILLIAM EASBY, of the City of Washington and the District of Columbia, have discovered a new and useful method of converting fine or powdered coal or refuse coal, either anthracite, bituminous, or charcoal, into solid lumps or blocks or prisms for the use of steam vessels or any other purpose in which fuel is required, which method is described as follows:

I take the fine coal and put it into a strong mold of the form and size of the intended blocks, lumps, or prisms to be formed, and of sufficient depth to remove the necessary quantity of fine coal. To form the required block, lumps, or prisms and subject the mass to sufficient pressure to cause the particles to adhere and form a solid mass, which may be effected by a piston of a size corresponding to that of the mold to be operated upon by any suitable mechanical means, and when the fine coal shall have been thus pressed into a solid body it will be discharged from the mold by any convenient mechanical means. The fine coal, being thus formed into solid cubes or other suitable forms, will be in a convenient state for packing, for transportation, or for burning.

The utility and advantage of the discovery

are that by this process an article of small value and almost useless can be converted into a valuable article of fuel for steamers, forges, culinary, or other purposes, thus saving what is now lost. The fuel thus prepared will be equal to any now in use. It will be highly advantageous for steam-vessels, as when formed into hexagonal prisms it can be stowed in a smaller space than other fuel. Its specific gravity being greater than that of the natural coal will also contribute to this advantage. For culinary purposes it will have an advantage over any other fuel. Its compactness renders it less liable to break or fall to pieces. It is contemplated to form the fuel for the last-named purpose into oval or egg-shaped lumps, thereby leaving no angles to be worn off by abrasion.

What I claim as my invention, and desire to secure by Letters Patent, is—

The formation of small particles of any variety of coal into solid lumps by pressure, in a manner and for the purposes substantially as herein described.

WM. EASBY.

Witnesses:

H. N. EASBY,
J. W. EASBY.

Рис. 1.3. Титульный лист патента William Easby (1848 год)

В литературе существует ошибочное представление о том, что первый валковый пресс был изобретён в 1865 году, что иллюстрируют рисунком из отчёта о брикетировании торфа, датированного этим же годом (рис. 1.5, [19]).

Однако видно, что на рис. изображен поршневой пресс, а не валковый. С 1901 года валковый пресс для брикетирования углей стала применять компания Кёрперн.

Историю промышленного брикетирования можно условно разделить на следующие периоды:

- начало XX века – 20-е годы XX века;
- 30–50-е годы XX века;
- 60–70-е годы XX века;
- 80-е – конец XX века;
- наше время.

(No Model.)

J. M. WILLCOX.
MACHINERY FOR COMPRESSING AND MOLDING POWDERY AND
PASTY SUBSTANCES.
No. 309,117. Patented Dec. 9, 1884.

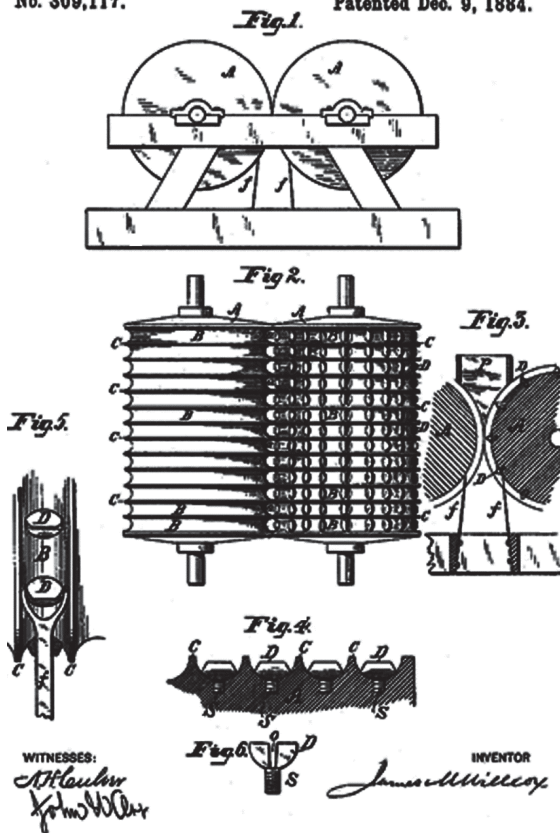


Рис. 1.4. Титульный патента J. M. Wilcox (1884 год)

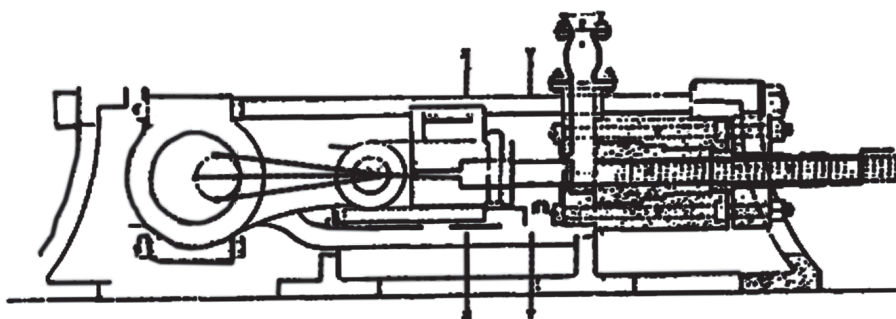


Рис. 1.5 Поршневой пресс для брикетирования торфа (1865 год)

Начало XX века – 20-е годы XX века

В начале XX века, когда металлурги столкнулись с необходимостью окучивания мелкой железной руды, было решено попытаться применить для этих целей технологию, применявшуюся к тому времени для производства кирпича.

Можно с уверенностью считать, что брикетирование берет своё начало с первого коммерчески успешного проекта производства брикетов из мелкой магнетитовой железной руды, реализованного в начале прошлого века в Швеции и в Финляндии, благодаря таланту и стараниям Густава Грёндаль (рис. 1.6). В Herrang (Швеция) и в Pitkaranta (Финляндии) были построены и введены в эксплуатацию брикетные фабрики в составе доменных цехов.



Рис. 1.6. Йохан Густав Грёндаль (11 февраля 1859 года – 16 марта 1932 года)

Грёндаль Йохан Густав родился 11 февраля 1859 года в Фреслунде (Швеция), скончался 16 марта 1932 года в Джурсхольме (Швеция). Его энергия и изобретательский талант в металлургии стали проявляться с началом его работы в 1880 году инженером на Медно-оловянном заводе в Питкяранта на Ладожском озере в Финляндии недалеко от российской границы. Густавом был внедрён ряд улучшений, которые вскоре привели к увеличению прибыли предприятия. Он изобрёл новые методы обогащения железных руд, которые до того считались непригодными для обработки. Эти методы включали магнитную сепарацию, брикетирование новые конструкции обжиговых печей. Особое значение имел для практики его рудные сепараторы и шаровые мельницы, которые отличались высокой степенью безопасности при эксплуатации. Грёндаль стал широко известен в 1910-х и 20-х годах благодаря своим многочисленным изобретениям в горнометаллургической отрасли и в топливных технологиях. Между 1894 и 1932 годами он выпустил в общей сложности 65 патентов, из которых 62 были национальными. Благодаря своим всемирно-запатентованным изобретениям и новым конструкциям он занял особое место среди металлургов и промышленных предпринимателей.

Им реализован целый ряд проектов в России, Германии, Австрии, Англии и в Маньчжурии. С его именем связана работа ряда известных компаний, таких как Herrängs Gruf AB, Luleå Ironworks AB и Totherrhättte electrothermal AB. Им же была основана компания The Grondal Kjellin Co. Густава Грёндаля отличала простота и личное обаяние, чувство юмора. Он всегда оставался оптимистом и сохранял юношеский задор на всем протяжении своей жизни.

Для производства брикетов использовали штемпельные прессы конструкции Сутклиффа (рис. 1.7) с давлением прессования 30–50 МПа. Патент на такой пресс был получен Эдгаром Сутклиффом из Ланкашира (Англия) 31 марта 1925 года. Патент № 1531631 был выдан в США 31 мая 1925 года и назывался «Пресс для производства кирпича, брикетов, блоков и тому подобного». Сам Сутклифф определил свое изобретение как «формовочное устройство плунжерного типа для производства кирпичей, брикетов, блоков и подобных затвердевших масс из угля или углеродсодержащих материалов, бетона, глины или других веществ или смесей, способных упрочняться за счет давления». Особенностью прессы Сутклиффа являлась возможность прессования увлажненного материала. Шихта для брикетирования, например, угля «могла состоять из одной части угля и полутора-двух частей воды или могла быть смесью, содержащей около 25 % воды». Формуемая масса подавалась в приёмную воронку прессы. Формование брикета осуществлялось при поступательном продвижении плунжера, выталкивавшего брикет из формы. Расход электроэнергии на производство тонны брикетов составлял 5 кВт·ч.

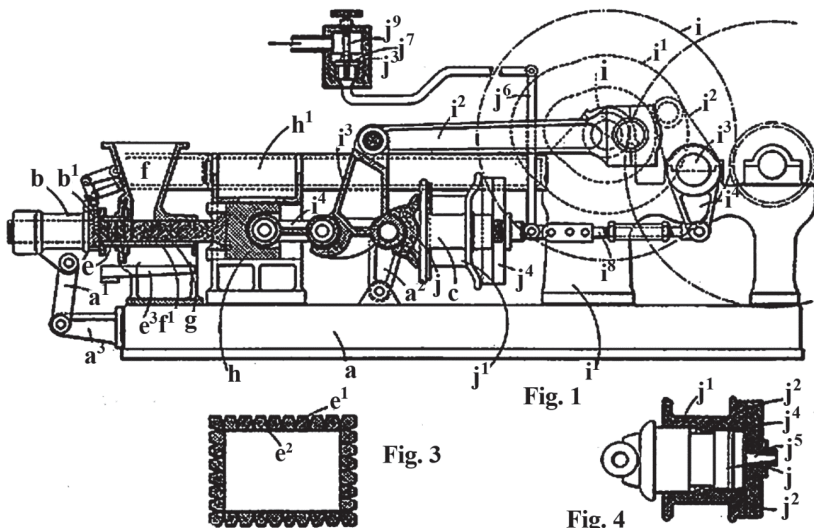


Рис. 1.7. Конструкция штемпельного прессы Сутклиффа для производства кирпичей и брикетов (патент № 1531631, Англия, 1925 год):

a – плита-основание; *b, c* – детали кривошипно-ползунного механизма, *e* – мульда (пресс-форма), *f* – приёмная воронка, *g* – плунжер, *h* – ползун)

Мелкодисперсный концентрат прессовали в брикеты без использования связующего материала, влажность в концентрате регулировали для получения брикетов с прочностью, достаточной для их удаления из пресса и загрузки на специальные тележки для доставки в обжиговые печи конструкции Густава Грёндаля. Им еще 28 декабря 1903 года был получен патент на конструкцию печи для обжига брикетов (патент № СА85977А). Необходимость обжига брикетов для придания им прочности, требуемой для доменной плавки, была обусловлена рядом причин. Достижение требуемой механической прочности без связующего и обжига потребовало бы приложения сверхвысоких давлений (свыше 200 МПа), как, например, в известном прессе Ронэя (рис. 1.8, [20]), который позволял получать плотные и прочные брикеты, пористость которых, однако, не способствовала их хорошей восстановимости при нагреве. Добавление органических связующих тоже не решало проблему. Во-первых, большинство из известных органических связок весьма дороги, а во-вторых, при нагреве органический материал выгорает либо подвергается пиролизу, что сводит на нет его вяжущее действие. Использование неорганических связок, кроме эффекта «разубоживания» – снижения содержания железа в шихте, в существенной степени влияет на состав чугуна и шлака, увеличивая выход последнего.

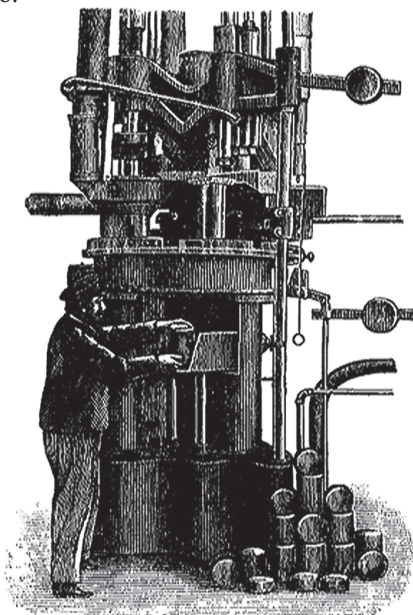


Рис. 1.8. Пресс де Ронэя

Обжиговая печь конструкции Грёндаля имела форму туннеля, с колеёй, ведущей вниз по центру, а посередине располагалась камера сгорания. Воздух, необходимый для горения, поступает под газонепроницаемую платформу

на подающем конце печи, и, пройдя нагнетательный конец, возвращается над платформами тележек, груженных брикетами. Холодный воздух, циркулирующий под платформой, удерживает колеса и каркас тележек в прохладном состоянии, нагревается, поскольку он одновременно охлаждает обожжённые брикеты и попадает в камеру сгорания горячим; горячие газы в свою очередь нагревают брикеты и охлаждаются сами до выхода из печи. Такая регенерация тепла повышала КПД печи. Потребление угля составляло в среднем 7 % от массы обжигаемого брикета, основные потери тепла были связаны с испарением воды в брикетах. Температура в камере сгорания при сжигании газа достигала 1300 или 1400 °С, и при таком нагреве частицы спекались достаточно, чтобы создать твердый прочный брикет. Важно, что при обжиге брикетов достигалась их десульфурация. Время, затрачивавшееся на операцию, зависело от типа руды и требуемой степени десульфурации. При содержании общего железа в руде 38 %, в концентрате его содержалось 68,3 %, а в брикете – 68 %. Для содержания серы, эти величины составили, соответственно, 0,066 %, 0,026 % и 0,006 %.

Процесс изготовления брикетов на фабрике в Herrang, обжиговые печи и брикеты на тележках изображены на рисунках 1.9 – 1.10, любезно предоставленных, так же как и рис. 1.11, Дэвидом Мишо (David Michaud) – владельцем интернет-ресурса 911Metallurgy Corp. [21]. Обращают на себя внимание размеры брикетов (150 × 150 × 75 мм), превышающие общепринятые размеры кирпича.

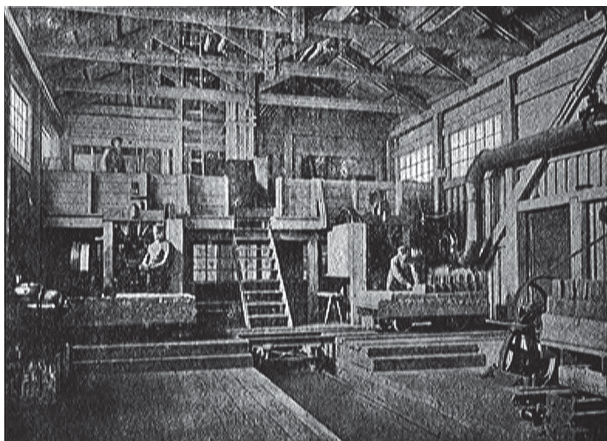


Рис. 1.9. Брикетная фабрика The Grondal Kjellin Co. в Швеции [21]

Тележки имели рамную конструкцию, футерованную огнеупорным кирпичом. Специальные устройства на переднем конце, канавка на заднем конце и фланцы по бокам, которые опускались в печи в канавку, заполненную песком, позволяли колонне таких тележек образовывать, таким образом, воздухонепроницаемую платформу.

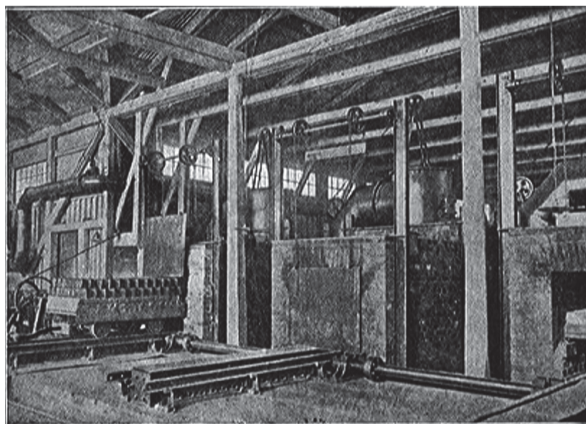


Рис. 1.10. Брикетная фабрика The Grondal Kjellin Co. в Швеции [21]

Брикеты изготовлялись по технологии Грёндаля и при более низкой температуре за счет использования различных вяжущих материалов. Так, например, в Питкяранте (Финляндия) в качестве связующего применялась известь (3–5 % массы брикета). После двухнедельного набора прочности брикеты дополнительно нагревали до 800 °С для последующего упрочнения. На брикетной фабрике в Эдисоне, (США) в качестве связующего использовались смолистыми вещества. Себестоимость брикета на этой фабрике составляла порядка 45 центов за тонну. Интересно, что оборудование для обогащения железной руды на этом предприятии было спроектировано самим Томасом Эдисоном.

Фабрика производительностью 60 тысяч тонн брикетов в год была вскоре построена и в Guldsmeshyttan (Швеция, рис. 1.11). Персонал фабрики составлял всего 14 человек.



Рис. 1.11. Брикетная фабрика The Grondal Kjellin Co. в Guldsmeshyttan (Швеция, [21])

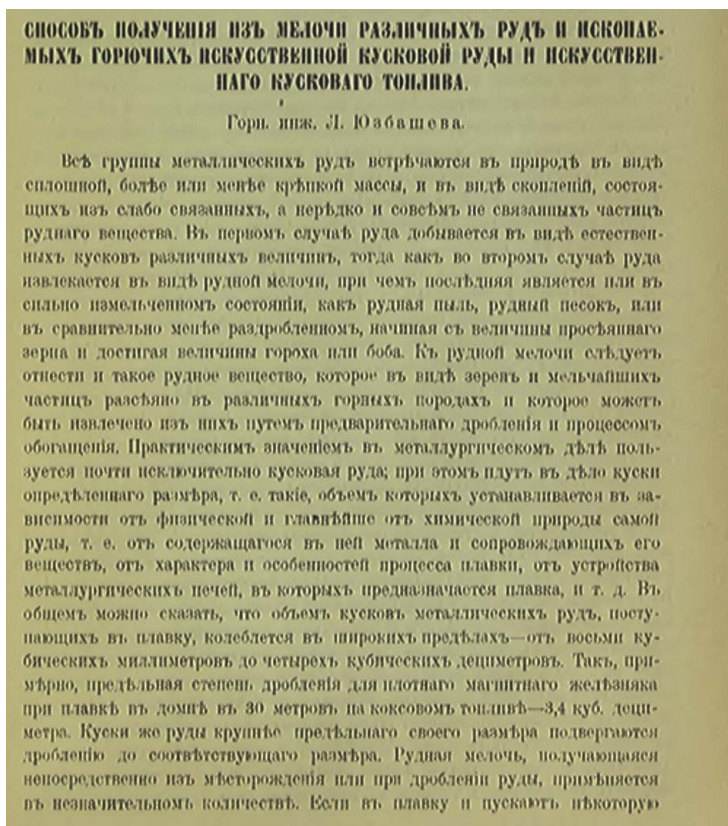
Подобные фабрики производительностью 40–60 тысяч тонн брикетов в год были ведены в эксплуатацию и в других шведских городах (Strassa, Bredsjo, Hjulsjo, Lulea, Uttersberg). Крупнейшая по тем временам брикетная фабрика, работавшая по технологии Грёндаля, была построена в Syd Varanger в Норвегии. Обоганительная фабрика имела производительность 1,2 миллиона тонн руды в год и была оснащена 56 шаровыми мельницами и 200 сепараторами конструкции Грёндаля а на самой брикетной фабрике брикеты обжигались в 20 печах описанной выше конструкции все того же Густава Грёндаля. Производительность брикетной фабрики составляла 600 тысяч тонн брикетов в год. Брикеты экспортировались в Германию. Фабрика с производительностью 100 тысяч тонн брикетов, которые так же экспортировались в Германию, была построена и в другом норвежском городе – Salangen.

Несмотря на большие размеры, эти брикеты успешно применялись в низкошахтной доменной печи производительностью 50–140 т/сутки на заводе в Pitkaranta. В процессе окислительного обжига магнетит окислялся до гематита, и из брикетов удалялась сера (на 98 %). Пористые брикеты (пористость 40 %) имели высокую механическую прочность (10 МПа) и хорошую восстановимость, что приводило к сокращению расхода кокса и повышению производительности доменной печи. Успех проекта способствовал быстрому распространению такой технологии. В 1913 г. работали уже 38 подобных линий брикетирования (16 в Швеции, 12 в Англии, 6 в США).

Примерно в это же время брикетированию стали подвергать и техногенные материалы черной металлургии, такие как колошниковая пыль и прокатная окалина. В Германии (Ilseder-Hütte) была создана опытно-промышленная установка для брикетирования этих материалов в смеси с глинистым шламом промывки бурого железняка. Смесь нагревали и прессовали при давлении 30 МПа. Брикеты набирали прочность в закрытом помещении, достигая прочности на сжатие около 10 МПа [22]. Так же, без связующего, брикетировали глинистую железорудную мелочь, колошниковую пыли и огарки, пластифицируя смесь помолом компонентов и увлажнением. Для формования применяли штемпельные прессы. Далее брикеты обжигали в шахтной печи (производительность до 40 тонн в сутки).

Успехи в брикетировании железорудной мелочи и техногенных материалов, достигнутые в самом начале двадцатого столетия и доминирование брикетирования как единственной промышленной технологии окускования вплоть до двадцатых годов прошлого века, позволяют считать это время своеобразным «золотым веком». Наряду с развитием и модернизацией оборудования для производства брикетов, развивались и совершенствовались и способы подготовки и обработки шихты для брикетирования. Опыт эксплуатации первых брикетных фабрик показал, что потенциал окускования без связующих материалов ограничен в силу недостаточно высокой прочности сырых брикетов и необходимости в дорогостоящем обжиге. В 1901 году российский горный инженер Л. Юзбашев предложил обойтись без обжига и использовать в качестве

связующего при брикетировании рудной мелочи гидравлический цемент (рис. 1.12, [23]).



**Рис. 1.12. Первая страница доклада Л. Юзбашева
в Горном журнале № 2 за 1901 год**

Его идея была вскоре воплощена на ряде российских заводов. Так же как и в процессе Грёндаля брикеты производились на обычных кирпичных прессах. К шихте добавляли угольную или коксовую мелочь, рубленую солому, опилки и другие материалы, которые, выгорая при нагреве брикетов в доменной печи, способствовали росту их пористости, а, значит, и лучшей восстановимости. Сушили брикеты на воздухе и после набора прочности направляли на шихтовый двор доменного цеха. Использование цемента позволило бы вывести из шихты часть флюсов, соответственно содержанию в нем CaO и MgO . Способ Юзбашева, однако, не получил широкого распространения вследствие относительно высокой стоимости цемента в те времена. К тому же содержание цемента в массе брикета (3–6 %) не обеспечивало целостность брикетов в зоне высоких температур доменной печи. «Первый блин комом».

К сожалению, этот неудачный опыт привел к появлению «мифа» о том, что цемент в принципе не способен обеспечить так называемую горячую прочность брикетов в силу того, портландцемент утрачивает свои вяжущие свойства при 750–900 °С. Это правда. Гидраты силикатов кальция разрушаются и при более низких температурах (400–500 °С). Но из минеральных фаз, образующихся при таких температурах, может, при определенных условиях, как было показано, в том числе, авторами, образовываться новая жидкая высокотемпературная связка. Современный опыт применения цемента в качестве связующего для доменных брикетов подтверждает справедливость такого вывода.

В то же время, в самом начале прошлого столетия, В. Шумахером (Германия) было предложено использовать в качестве связующего измельченные кварцевый песок (1–5 % от массы брикета) и негашёную известь (3–10 % от массы брикета). Этот порошок тщательно смешивали с рудой после увлажнения, а затем прессовали при давлении 40–70 МПа. Брикеты упрочнялись обработкой паром при давлении 1 МПа в течение 2–4 часов в автоклаве при температуре 174 °С [22]. Кстати именно Шумахеру приписывают авторство самого принципа автоклавной обработки [24]. В двух словах – это не что иное, как обработка материала при давлении выше атмосферного и при температуре выше 100 °С. При таком пропаривании образовывалось новое связующее из гидросиликатов кальция ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), который получался по реакции $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{SiO}_2 + (n - 1) \text{H}_2\text{O} = \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Прочность на сжатие таких брикетов достигала величины 10–13 МПа, отличала брикеты и сохранность при нагреве до температур доменной плавки. Способ был внедрён на двух металлургических заводах в Германии. Тем не менее, в практике брикетирования способ Шумахера не укоренился вследствие своей сложности и дороговизны.

Таким образом, к двадцатым годам прошлого века достижение требуемой для выплавки чугуна прочности брикетов обеспечивалось, главным образом, обжигом или иной температурной обработкой (пропаркой) а сама производительность брикетных фабрик ограничивалась производительностью оборудования, применявшегося в те времена для производства кирпича.

Производительность такого оборудования не отвечала растущим потребностям доменного производства в окискованном сырье. Брикетирование стало быстро вытесняться разработанной к тому времени технологией агломерации. Высокая производительность и технологичность процесса, возможность утилизации в нем неизбежных при выплавке чугуна и стали дисперсных железосодержащих материалов, обусловили ее стремительное распространение. Агломерация практически вытеснила брикетирование из черной металлургии. Так, например, к 1923 году почти все упомянутые выше гренадлевские брикетные фабрики были заменены аглофабриками.

Не спало положение с брикетированием и начавшееся в 20-е годы прошлого столетия применения валковых прессов для брикетирования природного и техногенного железосодержащего сырья. Историю возникновения

валковых прессов, их конструкцию и особенности применения в черной металлургии мы рассмотрим в главе 2. Важно, что валковые прессы были созданы специально для брикетирования, то есть не были «заимствованы» из промышленности строительных материалов. Валковые брикеты в начале XX века находили достаточное применение в низкошахтных доменных печах и в доменных печах небольшого объема. Брикетывали из железорудной мелочи, известняка и коксовой пыли. В доменных печах Кушвинского завода доля брикетов в шихте достигала 25 %. Брикетывали в количестве до 100 тыс. т в год применялись в шихте доменной печи Керченского (производительность брикетной фабрики в 1915 году составляла 35 тысяч тонн брикетов) и Таганрогского металлургических заводов (производительность брикетной фабрики в 1906 году составляла 30 тысяч тонн брикетов) [25].

30–50-е годы XX века

В 30-е годы прошлого века продолжился поиск эффективных и доступных связующих материалов. Любопытно, что такой поиск имел своей основной целью... снижение расхода энергии на обжиг. Одна из немногих попыток превратить брикетирование в настоящее «холодное», безобжиговое была связана с именем советского учёного-металлурга П. П. Казакевича, который в 1936 году проводил исследования по брикетированию колошниковой пыли с портландцементом в качестве связующего. Но, даже несмотря на удовлетворительные в целом результаты его исследований, способ не получил тогда распространения поскольку получение механически прочных брикетов требовало весьма продолжительного вылеживания. «Миф о цементе» укоренялся.

Еще одна заслуживающая упоминания попытка осуществить брикетирование без обжига была предпринята в 1936 году на Криворожской брикетной фабрике. Брикетывали из рудной мелочи богатой гематитовой руды. К рудной мелочи добавляли 5–10 % измельченной чугушной стружки и 0,5–1,0 % NaCl в виде раствора, который ускорял процесс образования гидратов окиси железа. Упрочнение брикетов достигалось в результате коррозии и гидратации чугушной стружки. Твердение брикетов для некоторых руд заканчивалось в течение нескольких часов после их изготовления. Для большинства руд срок набора прочности составлял 20–40 час. Брикетывали ни в сушке, ни в обжиге. В литературе этот способ брикетирования получил название способа Ярхо, по имени автора [22]. Такой же способ брикетирования был использован и на построенной в 1933 году брикетной фабрике в Нижнем Тагиле. Однако и этот, в целом успешный способ, не стал вехой в холодном окучивании. Очевидным недостатком способа была высокая стоимость используемых добавок и содержание в изготовленных таким способом брикетах щелочных соединений, ввод которых в доменную шихту крайне нежелателен.

В 1932 году Аверкиев и Удовенко опубликовали статью «Брикетирование колошниковой пыли и пылеватых руд силикатами щелочей», в которой

предложили использовать в качестве связующего так называемое «жидкое стекло» – водный щелочной раствор силикатов натрия $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ [26]. К брикетированной руде добавляли растворенное жидкое стекло, увлажнённую массу тщательно перемешивали и прессовали. Расход жидкого стекла для брикетирования, например, колошниковой пыли составлял не менее 15–18 % массы брикета. Спрессованные брикеты сушили и подвергали обжигу при температуре 400–500 °С, после чего они приобретали хорошую прочность и водоустойчивость. Недостатки способа выявились уже при первых опытных плавках. Брикеты не выдерживали высоких температур, отличались низкой пористостью. Да и само вяжущее, жидкое стекло, продукт весьма дорогой, что в совокупности с его существенным расходом, заметно снижавшим содержание железа в брикете, делало такое брикетирование экономически неоправданным и технологически неэффективным, поскольку требовало дополнительного расхода флюсов и увеличивало количество шлака в доменной плавке.

Способ, который позволял значительно уменьшить расход жидкого стекла для брикетирования, был вскоре предложен А. П. Фoniaковым [22]. Способ был основан на вяжущих свойствах гелей кремниевых кислот общей формулы $n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$, которые выпадают из раствора жидкого стекла при обработке слабым раствором хлористого кальция. Для получения такого геля руда перед прессованием последовательно обрабатывалась двумя растворами – сначала 1–2%-м раствором жидкого стекла, затем 1,5–2%-м раствором хлористого кальция и после этого прессовалась. Свежеотформованные брикеты сушили и затем обжигали при температуре 500–600 °С для дегидратации образовавшегося геля кремнекислоты. Готовые брикеты имели высокую прочность (18–22 МПа), пористость до 21 % и соответствовали требованиям, предъявлявшимся к доменным брикетам. Расход жидкого стекла в пересчёте на содержание SiO_2 заметно снижался (до 1,0–2,5 %), но такое снижение компенсировалось необходимостью дорогостоящего обжига. И этот способ не получил широкого распространения.

В 1957–1958 годах на Украине была проведена серия опытно-промышленных плавов с брикетами в шихте кислородного конвертера на заводе им. Петровского. Брикеты изготавливались по способу Ярхо (см. выше) на Криворожской брикетной фабрике. Состав шихты – железорудный концентрат, известняк, боксит и чугунная стружка фракции 0–3 мм. Сырые брикеты набирали прочность в течение недели в утеплённом складе. Подача набравших прочность брикетов осуществлялась по тракту сыпучих материалов с первой добавкой шихтовых материалов. Брикеты также загружались в конвертер и во время продувки. Всего было проведено свыше 100 плавов. В первых 60 плавках содержание оксида кальция в брикетах составляло 21,5 %, а недостающее количество флюсов вводилось в конвертер в виде извести. Проведенные плавки подтвердили возможность применения рудо-известняковых брикетов для регулирования температуры металлической ванны. Ход процесса с брикетами был более интенсивным, но выбросов