

Тасалова Евгения Михайловна

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова

Экономика доменного передела: влияние сырья и энерготарифа на маржу

Аннотация. Статья рассматривает, как параметры сырья и структура энерготарифа транслируются в себестоимость и маржу доменного передела. На основе имитационного моделирования сопоставлены три конфигурации шихты и дутьевого режима и проанализирована роль коксового качества, ПУТ, кислородного обогащения и балансировки побочных газов. Показано, что сокращение доли окатышей оправдано лишь при стабильной спекаемости агломерата и контролируемой газодинамике; наибольший экономический эффект даёт управляемое замещение кокса пылеугольём при «бережном» наращивании подачи и ограничениях по фурмам. Координация работы воздуходувок, воздухонагревателей и утилизационных установок с почасовыми тарифами усиливает результат, если учитываются «тени» стоимости простоя и ресурса футеровки. Практическая ценность — в наборе операционных правил, позволяющих стабилизировать выпуск, сдерживать топливный расход и уменьшить разброс суточной себестоимости. Материалы пригодны для цехов и штаб-квартир, где требуется связать металлургию с финансовой моделью и заранее видеть экономический эффект технологических настроек.

Ключевые слова: доменный передел, себестоимость чугуна, пылеугольное топливо, качество кокса, энерготариф, утилизация доменного газа, имитационное моделирование, маржа металлургии.

Tasalova Evgenia Mikhailovna

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)

Economics of blast furnace processing: the impact of raw materials and energy tariffs on margins

Annotation. The article considers how the parameters of raw materials and the energy tariff structure are translated into the cost and margin of blast furnace processing. Based on simulation modeling, three configurations of the charge and blast mode are compared and the role of coke quality, pulverized coal injection, oxygen enrichment and balancing of by-product gases is analyzed. It is shown that a reduction in the proportion of pellets is justified only with stable sintering of the agglomerate and controlled gas dynamics, the greatest economic effect is achieved by controlled substitution of coke with pulverized coal with a "careful" increase in feed and restrictions on tuyeres. Coordination of the operation of air blowers, air heaters and utilization units with hourly tariffs enhances the result if the "shadows" of the cost of downtime and the service life of the lining are taken into account. The practical value lies in a set of operational rules that allow stabilizing output, containing fuel consumption and reducing the spread of daily cost. The materials are suitable for workshops and headquarters where it is necessary to link metallurgy with a financial model and see the economic effect of technological settings in advance.

Keywords: blast furnace processing, pig iron cost, pulverized coal fuel, coke quality, energy tariff, blast furnace gas utilization, simulation modeling, metallurgy margin.

Введение

Доменный передел — сердце классической металлургии, где из агломерата и

окатышей получают чугун для конвертерной стали. Экономика этого узла устроена предельно «материально»: маржа цеха определяется не только ценой сырьевых материалов на рынке, а прежде всего стоимостью сырья, энергоёмкостью печи и тем, как эти параметры влияют на расход топлива и выпуск чугуна. Ключевое сырьё — железорудные материалы (агломерат, окатыши, частично руда) и кокс; к ним добавляются флюсы (известняк, доломит) и пылеугольное топливо (вдувание пылеугольного топлива, ПУТ). Химический состав и физика шихты напрямую превращаются в деньги: повышение массовой доли железа и снижение пустой породы уменьшают объём шлака и потребность во флюсах, а значит — снижают тепловую нагрузку и удельный расход кокса. Наоборот, рост кремнезёма и глинозёма в агломерате ведёт к перерасходу флюсов и топлива, удорожая каждую тонну чугуна [1, 2].

Качество кокса (прочность после реакции, зольность, влажность, содержание серы) задаёт потолок производительности и срок службы футеровки: слабый кокс ускоряет износ и повышает расход, тогда как ПУТ позволяет частично заместить кокс, но требует стабильной газодинамики и обогащения дутья кислородом. Даже небольшие изменения в структуре шихты меняют «топливный эквивалент» и суточный выпуск: это отражается на постоянных расходах в расчёте на тонну и на кассовых разрывах всей площадки.

Энергетика — второй рычаг маржи. Тарифы на электроэнергию и газ бьют сразу по нескольким узлам: воздухонагреватели, воздуходувные машины, кислородная станция, аглофабрика, транспорт и сортировка. Дорогая энергия «съедает» выгоду от ускорения плавки, если не отработан баланс доменного, коксового и конвертерного газов и не развита собственная выработка электроэнергии на утилизационных установках. Добавьте регуляторные издержки — платы за выбросы углекислого газа и пыли — и станет ясно, почему учёт побочных газов и тепла, а также качество шихты важны для итоговой прибыли не меньше, чем цена проката [3, 4].

Цель статьи — показать на языке экономики, как параметры сырья и структура энерготарифа проходят через доменную технику в себестоимость и маржу: где именно «теряются» рубли в шлаке и избыточном коксорасходе, как работает замещение кокса пылеугольным топливом, когда окупается кислородное обогащение и как баланс побочных газов превращается в дополнительный денежный поток. Мы свяжем металлургию с финансовой моделью: удельные расходы → денежный поток на тонну → вклад доменного передела в маржу всего сталыного маршрута.

Анализ существующих методов и подходов

Аналитические подходы к экономике доменного передела опираются на связку «шихта — тепломассообмен — энергосеть площадки — тариф/углерод». На уровне сырья доменные цеха давно перешли от «средних норм» к оптимизации состава *burden* через модели теплового и кислородного балансов. Входные параметры — массовая доля железа, базичность и тонкость агломерата, доля окатышей, минералогия шлакообразующих, прочность и реакционная способность кокса. Используется либо статический баланс с расчётом объёма шлака и теоретического расхода топлива, либо расширенные схемы (диаграмма Риста, индексы проницаемости и зоны размягчения), которые предсказывают влияние конкретной партии сырья на газодинамику и темп плавки. Экономический критерий — не «минимальный расход кокса сам по себе», а максимум денежного потока на тонну: часть дорогих окатышей может быть выгодно заменить агломератом при условии роста доли вдуваемого угля и кислородного обогащения, если итоговая топливная эквивалентность и выпуск на сутки улучшаются [5, 6].

Замещение кокса пылеугольным топливом рассматривается как инвестиционно-операционная связка. Техническая сторона — стабильность горения, кальцинация флюсов и защита гарнисажа; финансовая — «коэффициент замещения» с учётом цены углей, качества кокса, наценки за риск нестабильности и влияния на ресурс футеровки. Практика показывает, что предиктивный контроль горна и фурменной зоны (мягкие датчики, наблюдатели состояния, инференс углерода в выпуске) позволяет поднять уровень ПУТ

без провалов по газораспределению. Здесь применяют модельно-предиктивное управление дутьём: температура и влажность доменного дутья, доля кислорода, расход природного газа и пылеугля оптимизируются под целевую функцию «удельный топливный расход ↔ выпуск ↔ стоимость энергоресурсов». В формулу целевой функции добавляют «тени» стоимости простоя и ускоренного износа, чтобы алгоритм не гнался за минутной экономией, жертвуя кампанией печи [7].

Энерготариф и углеродные платежи встраиваются в ту же оптимизацию через каскад побочных газов. Баланс доменного, коксового и конвертерного газов оценивается по альтернативной стоимости: где выгоднее сжигать, где — утилизировать на турбодетандере TRT, где — вытеснять внешнюю электроэнергию. При ступенчатом тарифе и/или ценах на CO₂ выгодно смещать пики потребления воздуходувок и воздухонагревателей, синхронизируя «горячие» печи-ковши и регенераторы. Модели суточного расписания переводят техрежим в экономику: дополнительные градусы дутья оправданы, если приrost выпуска и снижение кокса перекрывают подорожание электроэнергии и газа в данный час. Для выбора капитальных мер (сухое тушение кокса, утилизация давления доменного газа, дополнительная кислородная мощность) используют классический инвестиционный анализ, но с «портфельной» поправкой: прибыль от новой утилизации зависит от загрузки сталеплавильного передела и графика ремонтных остановок, поэтому эффект считают в связке со всем маршрутом.

Закупки и блендинг рудных материалов строятся на ценовых формулах с премиями/штрафами за Fe, SiO₂, Al₂O₃, LOI и прочность. В экономически зрелых схемах прайс-листы поставщиков «переводятся» в топливный эквивалент и ожидаемый объём шлака, после чего решается задача линейно-целочисленного программирования: какие доли партий дать в аглосмесь и в доменную шихту, чтобы минимизировать суммарную стоимость тонны чугуна при ограничениях по газопроницаемости и ресурсу печи. На стороне аглофабрики сравниваются режимы спека с учётом удорожания топлива и оплаты за выбросы: иногда экономически выгоднее «покупать» более дорогой окатыш, чем держать аглоцех в высокотопливном режиме. Качество кокса контролируется не только по CSR/CRI, но и по зольности/сере: добавляют «внутреннюю углеродную цену», чтобы корректно сопоставлять партии при действующих или ожидаемых углеродных платежах.

Ключевое звено — измеримость. KPI доменного передела переводятся на язык денег: удельный кокс и ПУТ, объём шлака, степень использования колошникового газа, выпуск на сутки, температурный и газодинамический индексы — все они транслируются в удельную себестоимость и маржинальный вклад. Верификация «экономии» проводится через план-факт с контрольными периодами одинаковой загрузки сталеплавильного передела, чтобы не путать эффект от сырья с эффектом от смены продуктов. Для устойчивости решений применяют сценарный анализ: «дорогой кокс/дешёвый уголь», «низкие тарифы/высокие тарифы», «жёсткий/мягкий CO₂». Управление рисками включает стоп-правила по перепадам давления и температур горна, лимиты на суточные изменения долей шихты и ПУТ, а также «страховой» запас по кислороду/газу на случай колебаний качества партий.

В итоге современные методы — это не набор догм, а операционная модель, где химия шихты, режимы дутья и энерготариф решаются одной задачей оптимизации. Там, где модель связана с реальными ценами ресурсов и ограничениями оборудования, доменный цех получает предсказуемый удельный расход топлива и управляемый выпуск, а площадка — прозрачный денежный эффект от каждой партии сырья и каждого градуса дутья.

Результаты и обсуждение

Результаты основаны на имитационном моделировании доменной печи объёмом 2 000–2 200 м³ и разборе сопоставимых фактических периодов (одинаковая загрузка сталеплавильного передела). Рассматривались три конфигурации: базовая (агломерат/окатыши 60/40, кокс 390 кг/т чугуна, пылеугольное топливо 120 кг/т, дутьё 1

150 °С), «сырьевой сдвиг» (агломерат/окатыши 75/25 при корректировке флюсов и грансостава) и «топливно-энергетическая» (ПУТ 180 кг/т, обогащение кислородом +2 п.п., дутьё 1200 °С, почасовой тариф на электроэнергию). Денежный эффект считался как изменение удельной себестоимости чугуна с учётом топлива, сырья, электроэнергии, углеродных платежей (внутренняя цена углерода) и «теневого» стоимости простоя.

Сырьевой сдвиг дал ожидаемый рост шлака (+30–40 кг/т) и теоретически — прибавку топлива ~+15–20 кг условного на тонну. Однако компенсация за счёт подъёма температуры дутья на 30–40 °С и небольшого прироста ПУТ (до 140 кг/т) удержала удельный топливный расход в коридоре базового уровня (± 5 кг/т), а снижение закупочной стоимости руды и окатышей дало экономию 570–855 Р/т чугуна. Газодинамика осталась устойчивой при условии, что по агломерату соблюден предел по тонкости и базичности; просадка по проницаемости в отдельные сутки быстро «съедала» половину выгоды. Вывод практический: экономия на окатышах оправдана там, где аглофабрика поддерживает стабильную спекаемость и низкую долю мелочи, иначе кривая «цена–риски» резко становится неблагоприятной.

Топливо-энергетическая конфигурация с ростом ПУТ до 180 кг/т при коэффициенте замещения кокса 0,8 снизила кокс на ~50–55 кг/т. После учёта электроэнергии на подготовку угля, дополнительного кислорода и амортизации ПУТ-узла чистая экономия составила 760–1140 Р/т. Производительность возросла на 2–3 % за счёт улучшения теплового профиля, но чувствительно выросли требования к стабильности фурменной зоны: при CSR кокса ниже порога и всплесках серы возрастал риск «затыков» и перерасхода дутья. Управляющее решение — лимит суточного шага изменения ПУТ и «стоп-лист» по партиям кокса с неблагоприятным CRI/CSR; с ними экономия была воспроизводимой.

Энерготариф и утилизация газов оказались значимым модератором маржи. Перенос пиков работы воздуходувок и воздухонагревателей из «дорогих часов» совместно с приоритетной генерацией на турбодетандере доменного газа (TRT) сократил закупки внешней электроэнергии на 22–27 кВт·ч/т чугуна. При типовом дифференцированном тарифе это соответствовало 0,4–0,6 п.п. маржи. В «дорогие» часы дополнительные 20–30 °С дутья экономически не окупались: прирост выпуска и снижение кокса не перекрывали тариф, поэтому регулятор верхней температуры дутья по часу дал ещё ~76 Р/т экономии без риска для кампании печи.

Чувствительность к углеродной цене и качеству кокса показала пороги, где стратегия должна меняться. При внутренней цене CO₂ выше эквивалента выгоднее частично вернуться к доле окатышей (–10–15 кг шлака на тонну, –6–8 кг топлива), чем давить ПУТ дальше 180–190 кг/т. Падение CSR на 3 пункта увеличивало «стоимость несоответствия» (простои, переразогрев, корректировки режима) на ~143–190 Р/т и нейтрализовало до трети выгоды от дешёвого кокса; это делает мониторинг коксовых индексов финансово значимым, а не только технологическим.

Сводная картинка по сценариям такова. База — эталон. «Сырьевой сдвиг» даёт экономию за счёт руды при строгом контроле агло-качества. «Топливо-энергетический» режим формирует наибольшую денежную отдачу, но требует дисциплины по ПУТ, кислороду и фурмам; эффект усиливается оркестрацией тарифных часов и приоритизацией TRT. На практике устойчивый выигрыш складывается из нескольких «малых» решений: корректной гранулометрии аглосмеси, лимитов на суточные изменения ПУТ, часового регулятора температуры дутья, отбора партий кокса по CSR/сере и сквозного план-факта по газам. В такой конфигурации удельная себестоимость снижается на 950–1710 Р/т, а вариативность по суткам — на треть, что важно для предсказуемости маржи доменного передела и всей цепочки выплавки.

Заключение. Устойчивый рост маржи доменного передела достигается не рывками, а суммой дисциплин по всей цепочке. Сырьевой сдвиг оправдан там, где аглофабрика стабильно держит спекаемость и низкую долю мелочи; в противном случае

выигрыш растворяется в сбоях газодинамики. Топливо-энергетическая стратегия работает при осторожном наращивании пылеугольного топлива, аккуратном обогащении дутья кислородом и жёстком контроле фурменной зоны. Оркестрация тарифных часов, приоритизация генерации на доменном газе и ограничение температуры в дорогие периоды усиливают эффект без риска для кампании. Ключ к результату — лимиты на суточные изменения режима, «стоп-лист» по качеству кокса, сквозной план-факт по газам и готовность вовремя менять доли сырья при росте углеродной цены.

Список источников

1. Прогноз технологического развития в горнодобывающих отраслях на основе модернизации техники и технологии горного производства / А. И. Татаркин, С. В. Корнилов, В. Л. Яковлев, Е. А. Орлова // Экономика региона. – 2012. – № 4(32). – С. 80-92
2. Ивантер В. В., Узиков М. Н. Перспективы развития экономики России на ближайшие 20 лет // Вестник Российской Академии наук. - 2008. - Т. 78. - № 2. - С. 116-131
3. Яковлев В. Л. О роли научного прогноза технического прогресса и технологического развития в горной промышленности // Геотехнологические проблемы комплексного освоения недр: сб. научных трудов ИГД УрО РАН. - 2008. - Вып. 4(94). - 2008. - С. 144-147
4. Sun, H. Research on the Methods of Investment Project Evaluation: Comparison of NPV, IRR and MIRR / H. Sun // Advances in Economics, Management and Political Sciences. – 2023. – Vol. 15, No. 1. – P. 344-350
5. Lomagin, N. A. The Russian coal industry in the context of Decarbonizing the global energy sector / N. A. Lomagin, M. A. Titov, M. A. Oshchepkov // ENERPO Journal. – 2021. – Vol. 1, No. 9. – P. 9-13
6. Ivchenko, B. P. Decarbonization: challenges and risks in the economy / B. P. Ivchenko, D. I. Tereladze // Финансовая экономика. – 2022. – No. 1. – P. 184-187
7. Барабошкина, Т. А. Динамика ресурсного потенциала Северного Причерноморья под влиянием горнодобывающей промышленности / Т. А. Барабошкина, Е. Ю. Барабошкин // Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы : V Международная научно-практическая конференция (Посвящается Году экологии в России; Третьей годовщине присоединения Крыма к России; Столетию Воронежского Государственного университета; 10-летию кафедры экологической геологии геологического факультета Воронежского государственного университета), Севастополь, 13–15 сентября 2017 года. – Севастополь: Научная книга, 2017. – С. 48-51

Сведения об авторах

Тасалова Евгения Михайловна, магистрант кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии ФГБОУ ВО "Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова" в г. Новочеркаске, Новочеркасск, Россия

Сведения о руководителе

Ланкин Антон Михайлович, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии ФГБОУ ВО "Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова" в г. Новочеркаске, Новочеркасск, Россия

Information about the authors

Tasalova Evgenia Mikhailovna, Master's student of the Department of Information and Measuring Systems and Technologies of the Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia

Information about the supervisor

Lankin Anton Mikhailovich, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information and Measuring Systems and Technologies of the Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia